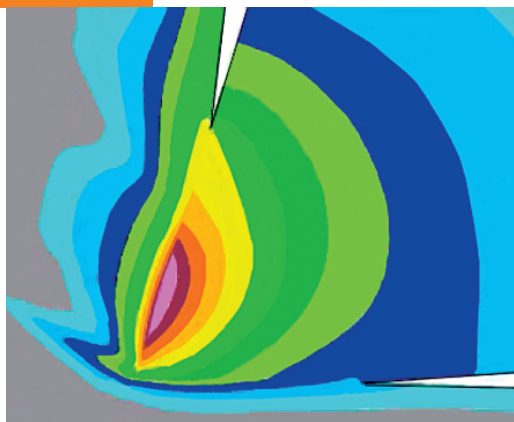


# ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ПРОЦЕССЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ РЕЗАНИЕМ



Учебник



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ  
Запорожский национальный технический университет  
Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»  
Сумский государственный университет

---

# **ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ПРОЦЕССЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ РЕЗАНИЕМ**

## **Учебник**

для студентов высших учебных заведений,  
обучающихся по специальностям  
«Прикладная механика» и «Отраслевое машиностроение»

Под общей редакцией  
А.И. Грабченко и В.А. Залого



Сумы  
Университетская книга  
2017

УДК 621.91(075.8)

ББК 34.63-1я73

И 73

Рекомендовано ученым советом Запорожского национального технического университета (протокол № 3 от 8 ноября 2016 г.) и Сумского государственного университета (протокол № 5 от 10 ноября 2016 г.)

Рецензенты:

*Д.В. Сталинский*, д-р техн. наук, проф., генеральный директор ГП УкрНТЦ «Энергосталь» (г. Харьков);

*В.М. Тонконогий*, д-р техн. наук, проф., директор Института промышленных технологий, дизайна и менеджмента Одесского национального политехнического университета

*Авторы:* Грабченко Анатолий Иванович, Залого Вильям Александрович, Внуков Юрий Николаевич, Везуб Николай Владимирович, Доброскок Владимир Ленинмирович, Майборода Владимир Станиславович, Марцинковский Василий Сигизмундович; Посвятенко Эдуард Карпович, Пыжов Иван Николаевич, Саленко Александр Федорович, Тарасюк Анатолий Петрович, Тарельник Вячеслав Борисович, Узунян Матвей Данилович, Фадеев Валерий Андреевич, Федорович Владимир Алексеевич, Якубов Февзи Якубович, Якубов Чингиз Февзийович

И 73      Интегрированные процессы обработки материалов резанием : учебник [для высш. учебн. заведений] / А.И. Грабченко, В.А. Залого, Ю.Н. Внуков и др. ; под общ. ред. А. И. Грабченко и В. А. Залого. — Сумы : Университетская книга, 2017. — 451 с.

ISBN 978-966-680-805-2

Учебник подготовлен в соответствии с программы и учебными планами ведущих технических университетов и отражает современный уровень информации о нетрадиционных способах изготовления изделий. Из огромного количества действующих технологий выбраны те, которые базируются на принципе интегрированных технологий и обеспечивают повышение эффективности всего производства. При создании учебника использованы оригинальные материалы отечественных и зарубежных вузов и научных центров.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальностям «Прикладная механика» и «Отраслевое машиностроение», а также для студентов, магистров и аспирантов машиностроительных специальностей, инженеров и технических работников машиностроительных отраслей.

**УДК 621.91(075.8)**

**ББК 34.63-1я73**

ISBN 978-966-680-805-2

© А. И. Грабченко, В. А. Залого,  
Ю. Н. Внуков и др., 2017

© ООО «ИТД “Университетская  
книга”», 2017

## **ВВЕДЕНИЕ**

Развитие современного производства потребовало серьезного всестороннего своевременного научного обеспечения.

Совершенно естественно, что уровень развития в разных странах не одинаков. Поэтому тенденции такого развития необходимо оценивать на примере промышленности развитых соответствующих стран. Каждая страна по-своему формирует и реализует государственную промышленно-экономическую политику, стимулируя те или иные отрасли, что не может характеризовать интегрированную отраслевую направленность экономики. Эти тенденции усиливаются под влиянием глобализации, которая приводит к созданию международных альянсов, и как результат, к интернациональному характеру конкуренции. Это требует поиска новых ресурсов.

Теория обработки материалов резанием является основной базой создания новых технологических процессов, овладение которой необходимо для решения главных проблем машиностроения и, прежде всего, станкостроения и инструментального обеспечения,.

Эффективность обработки различных материалов в большой степени зависит от того, насколько режущий инструмент, как один из важнейших элементов системы резания, способен реализовать свой ресурс в той или иной технологической среде с привлечением механо-физико-химических эффектов, совершенной геометрии, оптимального скоростного и температурного диапазонов и др.

Повышение наукоемкости отраслевых технологий, возможность использования системного подхода, тотальной компьютеризации и реализации потенциала CALS технологий (технологий, создаваемых на основе комплексного использования CAD/CAM/CAE/PDM систем с целью непрерывного информационного обеспечения жизненного цикла наукоемкой продукции) являются предпосылками создания интегрированных технологий, представляющих собой совокупность конструкторского, технологического и организационного обеспечения производства изделий.

Составляющими интегрированных технологий являются технологии генеративные, конвенциональные – разъединительные, соединительные и перераспределительные.

В общем плане интеграция рассматривается как объединение (слияние) материальных и нематериальных объектов, способов обработки, механо-физико-химических эффектов, инструментов, оборудования, транспортных средств и устройств, программного обеспечения, систем планирования и связи с целью получения принципиально новых результатов.

Таким образом, к интегрированным технологиям относятся такие, которые базируются на органическом сочетании последних достижений науки и техники, технологий, информатики, металловедения и др.,

использование которых обеспечивает быстрое получение нового продукта с принципиально новым уровнем функциональных, эстетических и экологических свойств, гарантирующих ему высокую конкурентоспособность на рынке.

Совершенно понятно, что первоначально должна появиться идея, затем отбор особых признаков составляющих структуры с учетом того, что признаки отбираются по высшим достигнутым результатам в отрасли.

Из всего этого огромного количества составляющих в данном учебнике внимание сосредоточено на интегрированных процессах резания и инструменте.

## **ГЛАВА 1. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ СОЗДАНИЯ ИНТЕГРИРОВАННЫХ ПРОЦЕССОВ РЕЗАНИЯ**

Современное состояние науки о резании материалов позволило рассматривать собственно понятие о режущем клине как элементарном источнике потенциала режущего ресурса обработки материалов резанием. Для всех процессов резания, включая абразивные процессы, отделение обрабатываемого материала (стружкообразование) осуществляется режущим клином.

Необходимость дифференциации элементарных режущих клиньев диктуется тем, что диапазон размеров (от нанометрического до макрометрического уровня) формы, геометрии стал чрезвычайно широким, что вылилось в необходимость определения базовых элементов системы резания, на основе чего появляется возможность прогнозировать потенциал того или иного способа обработки. Например, роль радиуса округления при нано - микрорезании не может быть оценена исходя из традиционных макропредставлений и не зависит от того, какова ее длина и конфигурации.

Достаточно указать на роль отдельно взятых составляющих системы резания даже чисто из математических представлений.

Режущая кромка формируется элементарными клиньями обрабатываемого материала. Например, для обрабатываемых пластичных материалов подобно тому, как формируется пластинчатый сердечник трансформатора, если отключиться от масштабного фактора.

Вместе с тем все меры, направленные на управление процессом резания и механизмом износа (применением СОТС, искусственного нагрева от внешних источников тепла, регулированием режимами резания, геометрией инструмента, свойствами обрабатываемого и инструментального материала и т.п.) выражаются, в конечном итоге, в соответствующем изменении общих энергетических характеристик системы резания и ее составляющих. И вне зависимости от того, оценивается конечный результат исследуемого параметра через изменения энергетических характеристик процесса резания или нет, эта связь имела место, подчиняясь общим закономерностям протекания любых процессов резания в рамках закона сохранения энергии: входные (задаваемые) условия – изменения в энергетических соотношениях процесса – результат. Именно эта связь является базой той совокупности факторов, которая позволяет, группируясь на достоинствах режущего клина, реализовать идею интеграции процессов резания, значительно расширяющую возможности создания высокоэффективных процессов обработки резанием.

### **1.1. Общий тепловой анализ зоны резания**

Закон сохранения энергии в процессе резания выражается, как известно,

в превращении работы резания ( $A_p$ ) в тепловую энергию ( $Q$ )\* и скрытую (внутреннюю) энергию деформации ( $\Delta U$ ), расходуемую на изменение свойств деформируемых объемов стружки ( $\Delta U_{стр}$ ), поверхностных слоев детали ( $\Delta U_{дет}$ ) и рабочих поверхностей инструмента ( $\Delta U_{инс}$ ), т.е.

$$A_p = Q \pm \Delta U \quad (1.1)$$

или в раскрытом виде

$$\begin{aligned} A_p &= A_{деф} + A_{тр.п} + A_{м.з} + A_{дисп} = \\ &= Q_{деф} + Q_{м.п.} + Q_{м.з} + Q_{дисп} + \Delta U = \\ &= Q_{дет} + Q_{стр} + Q_{инс} + Q_{окр} \pm (\Delta U_{дет} + \Delta U_{стр} + \Delta U_{инс}), \end{aligned} \quad (1.2)$$

где  $A_{деф}$ ,  $Q_{деф}$ ;  $A_{м.п.}$ ,  $Q_{м.п.}$ ;  $A_{м.з}$ ,  $Q_{м.з}$ ;  $A_{дисп}$ ,  $Q_{дисп}$  – соответственно работа и теплота: деформаций стружкообразования, трения по передней и задней поверхностям инструмента и диспергирования;

$Q_{дет}$ ,  $Q_{стр}$ ,  $Q_{инс}$ ,  $Q_{окр}$  – соответственно количество теплоты, переходящее в деталь, стружку, инструмент и окружающую среду.

Подведенная механическая энергия резания большей частью (97...99 %) превращаясь в тепло, в виде сложной комбинации тепловых потоков пронизывает всю систему резания (рис. 1.1), определяя режим и условия функционирования процесса. Возникающая при этом температура в сочетании с деформационными процессами вызывает изменение структурных и физико-механических свойств обрабатываемого и инструментального материалов и, как следствие, интенсивность износа инструмента.

Действительно, если учесть, что интенсивность широко проявляемого адгезионного износа определяется соотношением истинных твердостей контактных слоев инструментального –  $H_{и}$  и обрабатываемого материалов –  $H_{м}$ , то наиболее эффективные пути повышения стойкости должны вытекать из условия обеспечения избирательного влияния на степень трансформации свойств этих слоев. Реализация данного положения требует дифференцированной оценки роли деформационных (упрочняющих) и тепловых (разупрочняющих) процессов в протекании износа. При наличии такой информации создание оптимальных условий резания сведется к энергозагрузке или нагрузке контактных поверхностей, но в строго контролируемых пропорциях. В первом случае оптимального соотношения твердостей –  $H_{и}/H_{м}$  можно добиться за счет замедления процесса разупрочнения (или стимулирования упрочнения) контактных поверхностей инструмента путем их теплоразгрузки с требуемой интенсивностью, во втором, наоборот, – за счет превалирования процесса разупрочнения

---

\*Отметим, именно процесс резания сыграл решающую методическую роль при определении механического эквивалента теплоты в опытах В.Т. Румфорта в 1798 г. [1] по скоблению (сверлению притупленным сверлом) бронзовой болванки.

контактных объемов срезаемого слоя (соотносительно таковых инструмента) путем их теплонагрузки с требуемой для обеспечения этих условий интенсивностью.

Таким образом, разработка наиболее принципиальных путей повышения стойкости инструментов оказывается связанной с необходимостью установления энергетических характеристик контактных процессов.

Необходимость энергетического анализа процесса изнашивания диктуется также тем, что такой подход может открыть новые возможности для объяснения ряда явлений, трудно поддающихся анализу традиционными методами: отличий в темпах развития температур при обработке различных по свойствам материалов, роли изменения теплопроводности материалов в теплоразгрузке контактных поверхностей, причин превалирования износа по одной из поверхностей инструмента, отличающихся энергонагруженностью, особенностей влияния СОТС на энергетические соотношения процесса резания и т. п., то есть с единых позиций оценить содержание основных процессов, позволяющих управлять стойкостью инструмента.

## **1.2. Методики экспериментального определения мощности теплового потока, фактически развиваемого на контактных поверхностях с учетом теплообмена**

Температура контактных поверхностей инструмента с деталью и стружкой определяется величиной тепловой энергии, развиваемой на этих поверхностях. В условиях действия нескольких источников тепла и сложного теплообмена (рис. 1.1) температура контактных поверхностей будет определяться фактическим количеством теплоты, пронизывающей в единицу времени эти поверхности, то есть мощностью теплового потока –  $Q_{к.ф.}$

Величина этой теплоты ( $Q_{к.ф.}$ ) в условиях установившегося теплового баланса будет определяться мощностью и направлением тепловых потоков, проходящих через контактные поверхности инструмента. В связи с трудностями учета взаимовлияния указанных тепловых потоков исследовательская практика (как аналитическая, так и экспериментальная) при тепловых расчетах и измерениях, направленных на определение температуры контактных поверхностей, как правило, пользуется теплотой трения –  $Q_{тр.}$  Однако в реальных условиях сложного теплообмена (рис. 1.1) тепловые потоки, обусловленные теплотой трения ( $Q_{тр.}$ ), представляются наиболее мощными, но не единственными потоками, проходящими через контактные поверхности. Таким образом, мощность тепловой энергии, фактически развиваемая на контактных поверхностях и определяющая развитие соответствующих температур, будет отличаться от мощности тепловой энергии, обуславливаемой секундными значениями работы трения, то есть в общем случае

$$Q_{к.ф.} \neq Q_{тр.} \quad (1.3)$$

Ниже [2,3,4] излагается методика, позволяющая в реальных условиях резания определять мощность теплового потока, фактически развиваемого на контактных поверхностях ( $Q_{к.ф}$ ) с учетом теплообмена, осуществляемого через эти поверхности в замкнутой системе «инструмент – деталь – стружка».

Специфика методики заключается в том, что к естественному источнику тепла, действующему на трущихся поверхностях, добавляется дополнительная теплота (контролируемые величины джоулева тепла) до тех пор, пока суммарная теплота источников не достигнет значения, определяющего заданную температуру контактных поверхностей. По этому принципу можно определить мощность теплового потока, фактически действующего на контактных поверхностях в заданных условиях эксперимента.

Изложим содержание методики с помощью рис. 1.1.

При заданных постоянных начальных условиях определяется значение скорости  $V_n$ , при которой развивается принятое (заданное) значение температуры контактных поверхностей. Развитие принятой температуры при этой скорости обусловлено действием на контактных поверхностях тепловой энергии определенной (пока неизвестной) мощности. Если проводить резание на микроскоростях (допустим, при  $V_1 \leq 1$  м/мин), то количеством выделенного тепла можно пренебречь (ввиду его малости) по сравнению с количеством тепла, выделяемого при резании со скоростью  $V_n$  (всегда можно взять отношение  $(V_n/V_1) \geq 100$ ). При установленной скорости  $V_1$  в зону контакта вводятся контролируемые величины джоулева тепла с определенной интенсивностью до значения, обуславливающего развитие принятой (для скорости  $V_n$ ) температуры.

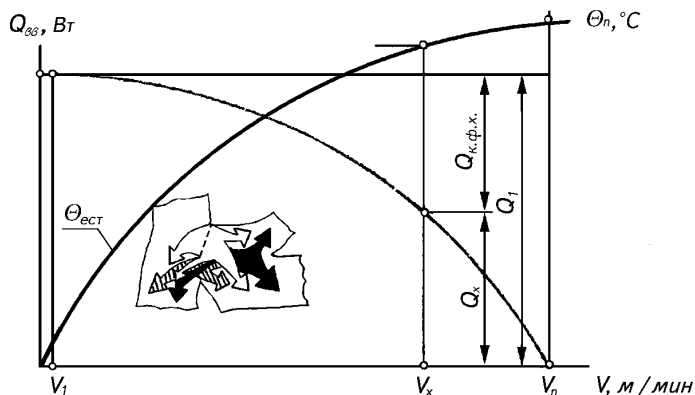


Рисунок 1.1 – Схема определения  $Q_{к.ф}$  – мощности теплового потока (с учетом теплообмена), развиваемой на контактных поверхностях

Величина введенного тепла  $Q_1$  в этом случае представляет собой мощность источника тепла, потребного для развития принятой температуры на контактных поверхностях.

При резании со скоростью  $V_x$  для достижения принятой температуры потребуется ввести в зону контакта меньшее количество теплоты, равное  $Q_x$ , так как на контактных поверхностях развивается естественная теплота, представляющая результирующую от работы трения и резания в условиях сложного теплообмена (см. рис. 1.1). Таким образом, разность в величинах  $Q_1 - Q_x$  будет соответствовать количеству теплоты, фактически развиваемой в единицу времени (мощности теплового потока) на контактных поверхностях –  $Q_{к.ф}$  для любой заданной скорости резания  $V_x$  при постоянных начальных условиях. Аналогично определяется  $Q_{к.ф}$  для измененных начальных условий: подачи, глубины, геометрических параметров резца, использования различных СОТС. С целью определения  $Q_{к.ф}$  и проведения комплекса исследований на его основе смонтирована специальная установка, схема которой представлена на рис. 1.2.

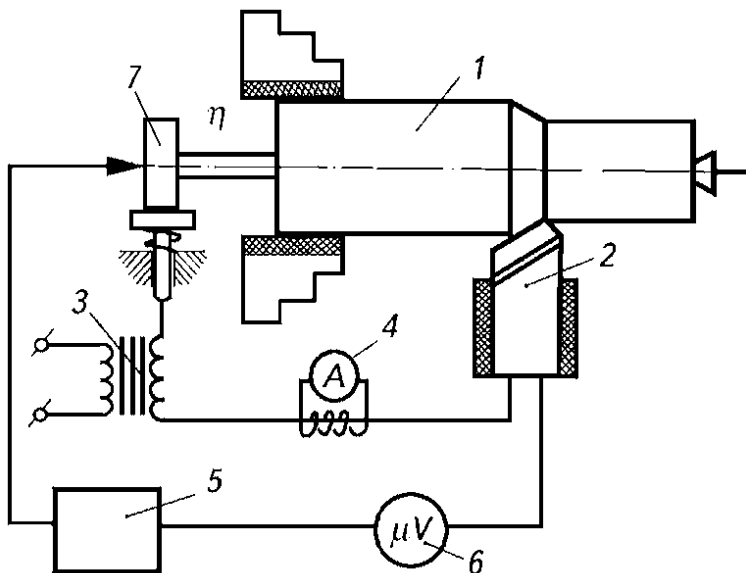


Рисунок 1.2 – Принципиальная схема установки для определения  $Q_{к.ф}$ :

- 1 – заготовка; 2 – резец; 3 – трансформатор сварочный; 4 – амперметр;
- 5 – блок фильтрации переменной составляющей от постоянной термо-ЭДС;
- 6 – милливольтметр; 7 – медные кольца

1. Схема цепи позволяет вводить в зону контакта контролируемые (непрерывно или дискретно) величины джоулева тепла:

$$Q = U_K - I \quad (1.4)$$

$$R_K = \frac{U_K}{I}; \quad (1.5)$$

и одновременно измерять электрическое сопротивление контакта в формулах (1.4) и (1.5):  $Q$  – мощность вводимого тепла, Вт;  $R_K$  – электросопротивление контактируемых поверхностей, Ом;  $U_K$  – падение напряжения в зоне контакта, В;  $I$  – сила тока в цепи, А.

2. Блок фильтрации (5), позволяет измерять температуру методом естественной термопары (6) при резании с электроконтактным нагревом.

3. Установка снабжена тензометрическим узлом для измерения усилия  $P_z$  при резании с электроконтактным нагревом.

Введение в зону резания контролируемых величин джоулева тепла осуществляется трансформатором (3), сила тока измеряется токовым трансформатором (4). Стабильность омического сопротивления контактов на трущихся узлах измерительной и токоподводящей систем обеспечивается специальным устройством, состоящим из двух пакетов автономно подпружиненных медных пластин (по 10 штук в каждом), трущихся по медному кольцу, насаженному на оправку (7). Такая система обеспечивает постоянство суммарной площади контакта и высокую стабильность его омического сопротивления. Трением же меди по меди предотвращается появление паразитных т.э.д.с.

Выбор в качестве источника искусственного нагрева электроконтактного способа обусловлен тем, что тепло при электроконтактном нагреве выделяется на участках цепи, характеризующихся наибольшими значениями электрического сопротивления. Этими участками при резании являются адгезионные пятна на контактных поверхностях, представляющие собой, с одной стороны, переходные сопротивления, с другой – участки, где выделяется теплота трения. Таким образом, теплота от работы трения и джоулево тепло выделяются на одних и тех же участках и их интенсивность определяется мощностью совершаемой работы трения и электроконтактного нагрева, то есть объемы нагретых участков оказываются практически одинаковыми. Это положение подтверждено данными ряда исследователей, показавших, что в условиях постоянства температуры, поддерживаемой варьированием скорости резания и искусственного нагрева, усилия резания [5], электрическое сопротивление контакта и усадка стружки [3], а также коэффициент трения [6] остаются неизменными.

### **1.3. Энергетический анализ контактных процессов при резании металлов в изотермических условиях**

Прочностные свойства материала, при строгом рассмотрении, не являются физическими константами и зависят от условий механических испытаний. Табличные данные, такие, как предел текучести, предел прочности, предел упругости и т.п., определяются при жестко регламентированных стандартных ограничениях и не всегда отражают поведение материала в реальных условиях нагружения [7, 8, 9, 10]. При лезвийной обработке материал испытывает воздействие высоких температур, скорости и степени пластической деформации, вызывающих развитие структурных превращений, повышение плотности дефектов кристаллического строения и механоактивационные химические реакции. Одним из активных факторов, влияющих на физико-механические свойства материала, является температура, которая, в свою очередь, зависит от всех внешних условий нагружения, то есть изменение любого режимного параметра процесса всегда приводит к изменению температуры. Такое положение затрудняет анализ процессов деформирования и разрушения материала, поэтому часто в экспериментальных исследованиях прибегают к изотермическим условиям испытаний, которые способствуют пониманию физики процесса деформации и упрочнения.

Моделирование изотермического резания позволяет уточнить автономное влияние деформационных и тепловых факторов на процессы контактного взаимодействия и стойкости режущего инструмента и провести сравнительный анализ активности адгезионного взаимодействия при резании различных материалов.

Изотермические условия резания можно моделировать двумя способами: подбором таких скоростей и подач, при которых температура резания принимает одно и то же значение, и искусственным нагревом зоны резания. Наиболее близким к реальному по характеру формирующегося температурного поля является, как показано выше, электроконтактный нагрев, позволяющий управлять процессом на основе введения контролируемых величин тепла.

Рассмотрим энергетические характеристики контактных процессов при резании различных по свойствам материалов на основе изложенной выше методики (см. рис. 1.1 и пояснение к нему).

На рис. 1.3 и 1.4 представлены экспериментальные данные, полученные при точении указанных материалов быстрорежущим Р6М5 и твердосплавным ВК8 резаками. Серия опытов при резании быстрорежущим инструментом проводилась во всех случаях с поддержанием температуры постоянной, равной 600°C, близкой к температуре теплостойкости, чтобы охватить весь диапазон скоростей резания, при использовании же ВК8 – 805°C (также близкой к температуре теплостойкости).

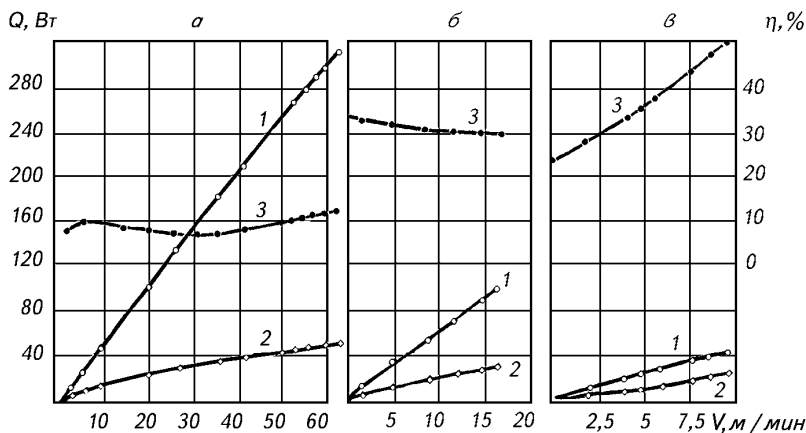


Рисунок 1.3 – Влияние скорости резания на тепловые характеристики процесса точения стали 45 (а), 12X18H10T (б), VT 22 (в) резцом из Р6М5. 1 – общее количество выделенного тепла –  $Q_{\text{общ}}$ ; 2 – мощность теплового потока (фактическая) на контактных поверхностях –  $Q_{\text{к.ф}}$ ; 3 –  $Q_{\text{к.ф}}/Q \cdot 100\%$  ( $S = 0,21$  мм/об,  $t = 0,5$  мм,  $\gamma = \lambda = 0^\circ$ ,  $\alpha = \alpha_1 = 12^\circ$ ,  $\varphi = \varphi_1 = 45^\circ$ )

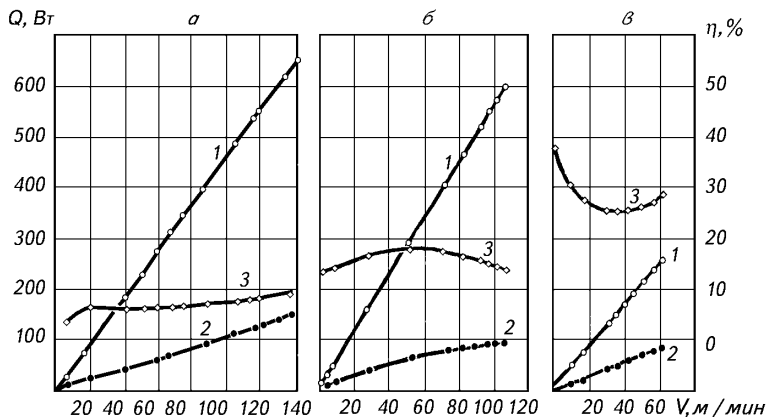


Рисунок 1.4 – Влияние скорости резания на тепловые характеристики процесса точения стали 45 (а), 12X18H10T (б), VT22 (в) резцом из VK8. 1 – общее количество выделенного тепла –  $Q_{\text{общ}}$ ; 2 – мощность теплового потока (фактическая) на контактных поверхностях –  $Q_{\text{к.ф}}$ ; 3 –  $Q_{\text{к.ф}}/Q_{\text{общ}} \cdot 100\%$  ( $S = 0,21$  мм/об,  $t = 0,5$  мм,  $\gamma = \lambda = 0^\circ$ ,  $\alpha = \alpha_1 = 12^\circ$ ,  $\varphi = \varphi_1 = 45^\circ$ )

Такая методика с учетом неизменности начальных условий (подачи, глубины, геометрии) создавала возможность для сравнительного анализа особенностей контактных процессов и причин, лимитирующих допустимый предел режимов резания различных по свойствам материалов.

Полученные данные позволяют отметить принципиальные особенности развития тепловых процессов при обработке указанных материалов. Общее количество выделяемого от процесса резания тепла  $Q_{\text{общ}}$  (кривая 1) не является параметром, позволяющим оценивать уровень развития температур при обработке различных материалов. Резание труднообрабатываемых материалов характеризуется развитием высоких (предельно допустимых) температур при значительно меньшем по сравнению с обработкой конструкционных материалов выделенном общем количестве теплоты резания. Это указывает на наличие процессов, оказывающих более значимое влияние на температуру резания. Учитывая, что общая теплота резания включает теплоту работы деформации и трения, остановимся на исследовании последнего, так как температура контактных поверхностей (принимаемая за температуру резания) определяется мощностью источников тепла (тепловых потоков), действующих на этих поверхностях. Теплота же деформации влияет на эту температуру косвенно.

Действительно, как вытекает из полученных данных (ср. кривые 2 на рис. 1.3 и 1.4), причины развития повышенных температур при резании нержавеющей стали и титанового сплава решающим образом связаны с особенностями контактных процессов при их обработке, характеризующихся при прочих равных условиях более высокими значениями тепловой энергии –  $Q_{\text{к.ф}}$ , развиваемыми на этих поверхностях относительно обработки конструкционной стали. Ее доля от общей теплоты резания (кривые 3) намного выше, чем при обработке конструкционных сталей, и составляет в диапазоне технологически целесообразных режимов: 35...55% для ВТ22, 18...28% для 12Х18Н10Т, тогда как для стали 45 эта величина не превышает 10%.

Рассмотрим особенности теплового баланса (баланса работ) при резании указанных материалов в режиме постоянной температуры.

Данные рис. 1.5 и 1.6 получены при обработке трех исследуемых материалов быстрорежущим (Р6М5) и твердосплавным (ВК8) резаками при постоянной температуре, соответственно равной 560°C и 760°C.

Анализ полученных результатов показывает, что одни и те же значения температур при обработке различных материалов достигаются различным соотношением энергий, развиваемых работой деформации и трения. При обработке сталей 45 и 12Х18Н10Т наибольший вклад в тепловой баланс вносится работой пластических деформаций ( $\eta_{\text{пл.д}}$ ), при обработке же сплава ВТ22, характеризующегося пониженной пластичностью, доля теплоты деформации в общем балансе значительно ниже.

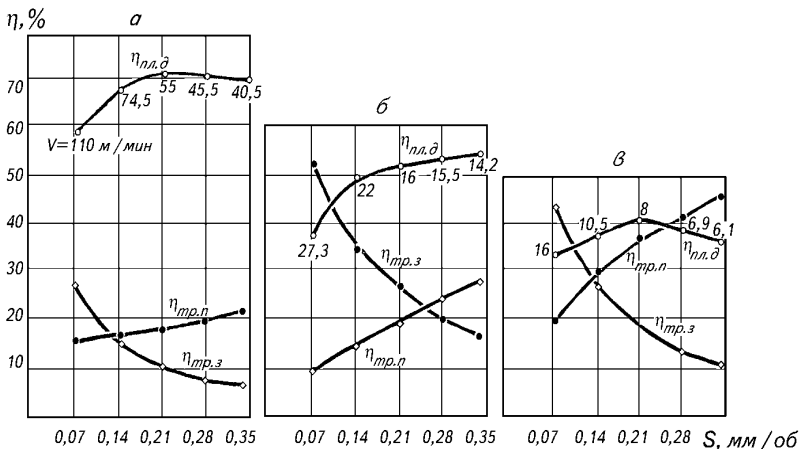


Рисунок 1.5 – Тепловые соотношения процесса точения стали 45 (а), 12Х18Н10Т (б), ВТ22 (в) резцом из Р6М5 на режимах, соответствующих постоянной температуре – 560°С

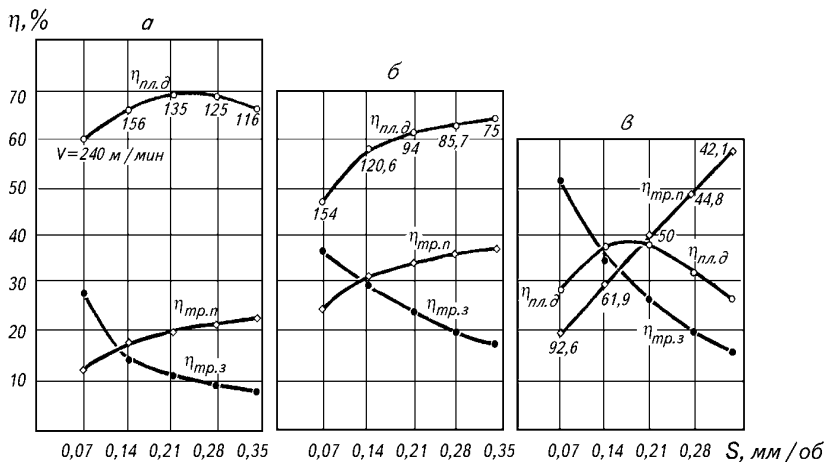


Рисунок 1.6 – Тепловые соотношения процесса точения стали 45 (а), 12Х18Н10Т (б), ВТ22 (в) резцом из ВК8 на режимах, соответствующих постоянной температуре – 760°С

Несколько меньше, чем при резании стали 45, удельный вес теплоты деформации в общем балансе при обработке нержавеющей стали. Этот результат, на первый взгляд кажущийся неожиданным (так как нержавеющая сталь обладает более повышенными, чем сталь 45, пластическими свойствами), можно объяснить повышенной ролью вторичных пластических деформаций, протекающих на контактных поверхностях.

Действительно, при обработке нержавеющей стали (рис. 1.5, б и 1.6, б) относительное количество теплоты трения по передней  $\eta_{тр.п}$  так же, как по задней  $\eta_{тр.з}$ , значительно выше аналогичных характеристик при резании стали 45. Повышенными (по сравнению с обработкой сталей 45 и 12X18H10T) относительными количествами теплоты трения по передней и задней поверхностям инструмента характеризуется и тепловой баланс при резании сплава ВТ22 (рис. 1.5 в и 1.6 в). Таким образом, основная особенность теплового баланса при резании нержавеющей стали и титанового сплава заключается в значительно увеличенной относительно конструкционной стали роли теплоты трения в развитии заданной температуры, то есть более высокая энергонагруженность контактных процессов снижает уровень применяемых скоростей при обработке указанных материалов.

Применительно к резанию плотность теплового потока на контактных поверхностях инструмента можно определить как

$$q_{к.ф} = \frac{Q_{кф}}{F_K}, \quad (1.6)$$

где  $F_K$  – площадь контакта стружки с передней поверхностью инструмента.

В таблице 1.1 приведены численные значения  $q_{к.ф}$  при резании стали 45, 12X18H10T и ВТ22.

Сравнительный анализ результатов таблицы 1 показывает, что близкие численные значения общего теплового потока при резании различных материалов при пересчете на плотность тепловых потоков разнятся в отдельных случаях почти на порядок.

Таблица 1.1 – Сравнительные значения тепловых параметров процесса резания

Скорость резания	10 м/мин			50 м/мин		
	P6M5			BK8		
Инструмент						
Обрабатываемый материал	сталь 45	12X18H10T	ВТ22	сталь 45	12X18H10T	ВТ22
$Q_{общ}, \text{Вт}$	45	49	40	300	330	265
$Q_{к.ф}, \text{Вт}$	4	16	20	30	45	54
$q_{к.ф}, \text{Вт/мм}^2$	17,5	25	113	53,6	73,5	390
Температура, °C	260	400	560	460	635	760

В количественном выражении плотности тепловых потоков контактного взаимодействия при изотермическом резании различных материалов характеризуются своим соотношением и структурой энергетических затрат (рис. 1.5 и 1.6). При точении конструкционной стали высокая плотность теплового потока достигается за счет больших скоростей резания, а при резании титанового сплава – за счет повышенных контактных нагрузок. Следовательно, при идентичности тепловой нагруженности зоны вторичной пластической деформации напряженно-деформированное состояние контактной системы имеет серьезные различия. Фрикционное взаимодействие при резании конструкционной стали реализуется на фоне повышенных скоростей пластических деформаций поверхностных слоев инструмента, а при обработке титановых сплавов за счет повышенных нормальных и касательных нагрузок. При такой схеме напряженного состояния инструментальный материал проявляет больше пластичных свойств.

Таким образом: изотермические условия резания позволяют обнаружить, что каждый режим контактного взаимодействия характеризуется своей степенью и скоростью деформационных процессов. Высокие скорости резания способствуют развитию больших скоростей пластической деформации контактных поверхностей инструмента, а повышенные значения контактных нагрузок – соответствующие высокие степени пластической деформации. В результате контактные слои стружки, обработанной поверхности и режущего инструмента претерпевают структурные изменения, связанные с повышением плотности дефектов кристаллического строения и механоактивацией. Образующиеся структуры носят динамическую природу и существенно теряют свои свойства при отсутствии процесса резания и это обстоятельство затрудняет анализ таких структур.

#### **1.4. Энергетический анализ влияния теплопроводности обрабатываемого материала на теплонагрузку контактных поверхностей**

Одной из главных причин, обуславливающих развитие высоких температур при резании труднообрабатываемых материалов, считается их низкая теплопроводность. По расчетам профессора А.Н. Резникова [5], заготовка представляется достаточно мощным теплоприемником, существенно влияющим на тепловую обстановку в замкнутом контуре «резец – деталь – стружка». Однако экспериментальная оценка степени влияния теплофизических характеристик обрабатываемого материала на температуру резания представляется достаточно сложной, тем более что эти характеристики при резании не остаются постоянными, изменяясь, во-первых, в значительных пределах и, во-вторых, неоднозначно для различных материалов.

Оценить влияние теплопроводности обрабатываемого материала на энергетические показатели контактных процессов в непосредственных условиях резания возможно путем сравнения мощности теплового потока, фактически потребной для развития заданной температуры, то есть  $Q_{к.ф}$  с мощностью теплового потока трения –  $Q_{тр}$  в этих же условиях. Как было указано выше, в общем случае  $Q_{к.ф} \neq Q_{тр}$  и это неравенство обусловлено взаимовлиянием тепловых потоков в замкнутом контуре «деталь – стружка – инструмент – деталь», на отдельных участках которого действуют источники различной мощности. В этих условиях интенсивность теплообмена будет определяться теплофизическими свойствами элементов контура или, при неизменном резце, свойствами детали и стружки.

На рис. 1.7 представлены значения  $Q_{к.ф}$  (кривые 1) и суммарные значения тепловых потоков трения по передней  $Q_{тр.п}$  и задней  $Q_{тр.з}$  поверхностям (кривые 2).

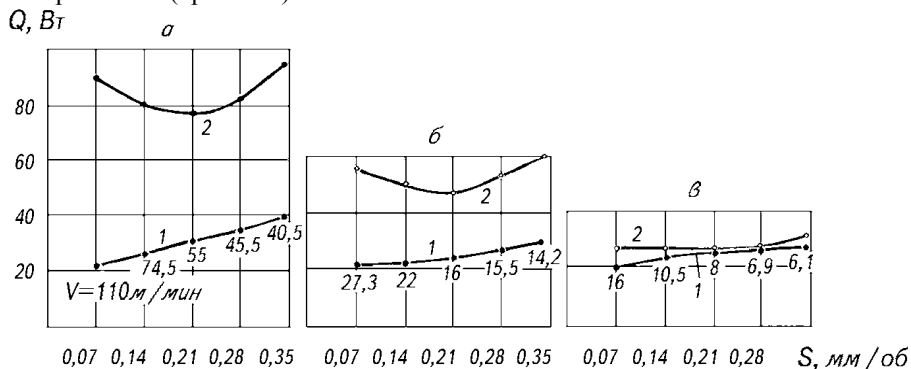


Рисунок 1.7 – Мощность теплового потока трения (2) и фактическая мощность теплового потока на рабочих поверхностях резца из Р6М5 (1) при 560°С: а – сталь 45, б – 12Х18Н10Т, в – ВТ22 (цифрами указаны значения скоростей резания)

Силы трения, необходимые для определения  $Q_{тр.п}$  и  $Q_{тр.з}$ , измерялись экспериментально разрезным резцом и методом экстраполяции соответствующих сил резания на нулевую толщину при  $h_3 = 0, 25$  мм [6], которая оставалась постоянной во всех опытах. Выбор последней, равной 0,25 мм, был обусловлен тем, что тепловой баланс и стабильные значения температур устанавливаются, как правило, с завершением начального (интенсивного) периода износа, характеризующегося в подавляющем большинстве случаев значениями  $h_3$ , равными 0,2...0,3 мм.

Проанализируем полученные результаты при обработке

рассматриваемых материалов сравнением мощностей, потребных для развития постоянной (равной  $560^{\circ}\text{C}$ ) температуры  $Q_{\text{к.ф}}$  (кривая 1) и выделяемой от работы трения  $Q_{\text{тр}}$  (кривая 2).

При обработке стали 45 от суммарной работы трения по передней и задней поверхностям (рис. 1.7 а, кривая 2) выделяется в среднем в 2,5 раза больше тепла, чем требуется для развития заданной ( $560^{\circ}\text{C}$ ) температуры (рис. 1.7 а, кривая 1). При резании нержавеющей стали это превышение составляет в среднем 1,8 раза (ср. кривые 2 и 1 рис. 1.7 б). При обработке же титанового сплава потребные и выделяемые от работы трения мощности тепловых потоков практически одинаковы  $Q_{\text{к.ф}} = Q_{\text{тр}}$  (рис. 1.7 в, кривая 1 и 2). Так как во всех опытах материал резца (и его размеры) оставались неизменными, изменение величины теплоагрузки контактных поверхностей ( $Q_{\text{тр}} - Q_{\text{к.ф}}$ ), при обработке различных материалов должно быть связано с их теплофизическими свойствами. Действительно, сталь 45, имеющая относительно высокую теплопроводность, обеспечивает наиболее интенсивную теплоагрузку контактных поверхностей, отводя в условиях совершающегося теплового баланса до 70% теплоты трения. В этих же условиях нержавеющая сталь, имеющая более низкую, чем у стали 45, теплопроводность, отводит около 40% теплоты, выделяемой от работы трения. При резании же титанового сплава, характеризующегося наименьшей теплопроводностью (среди исследуемых материалов), отвод теплоты трения за счет теплопроводности материала практически не реализуется (то есть  $Q_{\text{тр}} \approx Q_{\text{к.ф}}$ ).

С целью уточнения полученных соотношений при резании на более высоких скоростях (температурах) были проведены опыты по обработке исследуемых материалов твердосплавным резцом ВК8. Полученные данные, соответствующие одинаковой температуре –  $760^{\circ}\text{C}$ , представлены на рис. 1.8.

Ожидалось, что установленные выше соотношения при температуре резания  $560^{\circ}\text{C}$  в принципе сохранятся. Однако результаты оказались, на первый взгляд, неожиданными, а именно:

– при резании стали 45 разность кривых 2 и 1, то есть разность выделяемой от работы трения и потребной для развития  $760^{\circ}\text{C}$  тепловой энергии ( $Q_{\text{тр}} - Q_{\text{к.ф}}$ ), значительно уменьшилась относительно резания при температуре  $560^{\circ}\text{C}$ ;

– при резании нержавеющей стали эта разность, наоборот, несколько увеличилась по сравнению с резанием при температуре  $560^{\circ}\text{C}$ ;

– при резании титанового сплава рассматриваемая разность развиваемой от работы трения и потребной для установления  $760^{\circ}\text{C}$  тепловой энергии увеличивалась наиболее существенно.

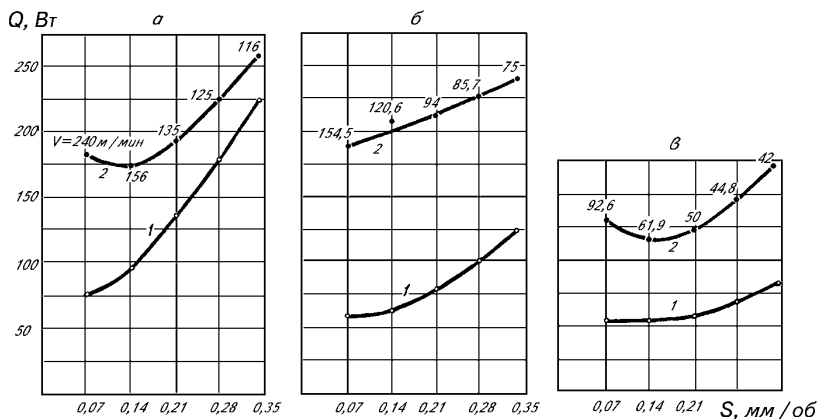


Рисунок 1.8 – Мощность теплового потока трения (2) и фактическая мощность теплового потока на рабочих поверхностях реза из ВК8 (1) при 760°C: а – сталь 45, б – 12Х18Н10Т, в – ВТ22 (цифрами указаны значения скоростей)

В сравниваемых опытах начальные условия оставались постоянными, были изменены температура резания (от 560°C до 760°C) и материал инструмента (Р6М5 был заменен на ВК8). Однако полученные результаты нельзя объяснить измененными свойствами инструментального материала, так как инструмент оставался неизменным при обработке всех трех материалов. Поэтому он должен был бы во всех случаях, учитывая постоянство температуры, обусловить изменение теплоразгрузки на постоянную величину. В полученных же результатах темпы изменения теплоразгрузки неоднозначны.

На рис. 1.9 сведены зависимости коэффициентов теплопроводности рассматриваемых материалов от температуры [11, с. 7; 12, с. 87; 13, с. 20].

Обращает на себя внимание то обстоятельство, что при увеличении температуры от комнатной до 800°C коэффициент теплопроводности стали 45 уменьшается в 6 раз, тогда как в этом же диапазоне температур коэффициент теплопроводности нержавеющей стали и титанового сплава увеличивается соответственно в 1,2 и 3,0 раза. Такие темпы изменения приводят к тому, что при температурах, превышающих 700°C, коэффициенты теплопроводности титанового сплава и нержавеющей стали становятся выше, чем у стали 40 (при температуре 800°C даже более, чем в 2 раза).

На основании этих данных становится возможным объяснение причин различной степени теплоразгрузки контактных поверхностей с изменением температуры при резании различных материалов.

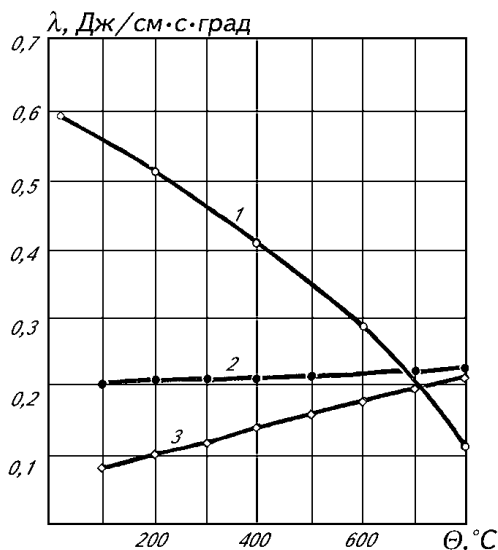


Рисунок 1.9 – Зависимость коэффициента теплопроводности различных материалов от температуры: 1 – сталь 40; 2 – нержавеющая сталь; 3 – титановый сплав

Действительно, при температуре 560°C коэффициенты теплопроводностей рассматриваемых материалов имеют соответственно наибольшие значения у стали 40 ( $\lambda = 0,3$  Дж/см·с·град), средние у нержавеющей стали ( $\lambda = 0,23$  Дж/см·с·град) и наименьшие у титанового сплава ( $\lambda = 0,16$  Дж/см·с·град).

В полном соответствии с этим наибольшая теплоразгрузка ( $Q_{тр} - Q_{к.ф}$ ) при температуре 560°C реализуется при резании стали 45, она несколько меньше при обработке нержавеющей стали и практически не реализуется разгрузка теплоты трения при резании титанового сплава (рис. 1.7) При температуре 760°C (см. рис. 1.9) в связи с изменением коэффициентов теплопроводности наименьшая теплоразгрузка контактных поверхностей должна осуществляться при обработке стали 45, титановый сплав должен обусловить значительно больший отвод тепла от контактных поверхностей как относительно стали 45 при данной температуре, так и относительно себя при резании с температурой 560°C. При обработке нержавеющей стали, характеризующейся незначительным изменением коэффициента теплопроводности, разность  $Q_{тр} - Q_{к.ф}$  должна незначительно увеличиваться (в относительных величинах) с повышением температуры. Сравнение экспериментальных данных рис. 1.7 и 1.8 полностью согласуется с изложенным.

Если при температуре 560°C отвод тепла от контактных поверхностей составлял при резании стали 45 в среднем 70% от выделяемого при трении, нержавеющей стали – 40%, титанового сплава практически отсутствовал, то при температуре 760°C отвод тепла от этих же поверхностей при резании стали 45 составил 28%, нержавеющей стали – 55%, титанового сплава – 50%, то есть в результате изменения теплопроводности с увеличением температуры (от 560°C до 760°C) относительная теплоразгрузка контактных поверхностей при обработке стали 45 уменьшилась на 42%, тогда как при резании нержавеющей стали и титанового сплава она увеличилась соответственно на 15% и 50%.

Таким образом, полученные данные и представленный анализ показывают значительное влияние температурных изменений теплопроводности обрабатываемого материала на энергетические показатели контактных процессов, а, следовательно, и температуру резания.

Из представленного материала вытекает важное заключение. В литературе по резанию металлов утверждено мнение, что одной из основных причин низкой обрабатываемости титанового сплава и нержавеющей стали является их относительно пониженная теплопроводность. Результаты изложенных исследований показывают, что при режимах резания, обуславливающих развитие температур более 700°C, причина низкой обрабатываемости указанных материалов не должна расцениваться с позиции их пониженной теплопроводности, так как при этих температурах они (и подобные им материалы) могут иметь более высокий, чем конструкционные стали, коэффициент теплопроводности, реализуя более интенсивную теплоразгрузку контактных поверхностей. Такие распространенные операции, как точение и фрезерование, выполняются при температурах, превышающих 700°C, что усиливает значимость сделанного заключения.

### **1.5. Энергетическая оценка причин превалирования износа по одной из поверхностей инструмента**

Зоны активных фрикционных процессов резания располагаются в области контактного взаимодействия на передней и задней поверхностях инструмента, каждая из которых имеет свои отличительные режимы функционирования. В результате стойкость инструмента и, как следствие, уровень допустимых режимов резания в одних условиях лимитируется за счет преимущественного развития износа по задней поверхности, в других – по передней. Управление износом должно учитывать данное обстоятельство, так как не редки процессы, когда за критерии стойкости инструмента принимается предельно допустимая величина износа по одной поверхности, а процесс изнашивания более активно протекает по другой. В этом случае стойкостная зависимость практически теряет трибологический смысл, не раскрывая истинную картину фрикционного процесса.

В таблице 1.2 представлены соотношения сил и работ трения, развиваемых на задней и передней (при  $S = 0, 21$  мм/об,  $t = 0, 5$  мм) поверхностях твердосплавного инструмента при резании рассматриваемых материалов в режиме постоянной температуры, равной  $760^{\circ}\text{C}$  (силы трения определялись методом разрезного реза и методом экстраполяции составляющих сил резания на нулевую толщину среза).

Таблица 1.2 – Соотношения сил и работ трения при точении сталей 45, 12X18H10T и сплава ВТ22;  $\theta = 760^{\circ}\text{C}$

Соотношение сил и работ трения	Обрабатываемый материал		
	Сталь 45	12X18H10T	ВТ22
$F_{\text{тр.з}}/F_{\text{тр.п}}$	0,19	0,29	0,6
$A_{\text{тр.з}}/A_{\text{тр.п}}$	0,54	0,65	0,81

Как видно из таблицы, при резании нержавеющей стали и титанового сплава соотношения сил и работ трения значительно превышают таковые при обработке конструкционной стали, указывая на повышенную роль в протекании контактных процессов сил трения по задней поверхности в первом случае. Это качественная картина.

Попытаемся рассмотреть причину превалирования износа на основе количественных соотношений работ, расходуемых на износ единицы объема по соответствующим поверхностям инструмента, так как износ в конечном счете происходит в результате затраты работы сил трения.

На рис. 1.10 приведены значения удельных работ  $a_{\text{тр.п}}$  и  $a_{\text{тр.з}}$  расходуемых на износ единицы объема  $W_{\text{п}}$  и  $W_{\text{з}}$  соответственно передней и задней поверхностей. Данные отражают условия опытов, проведенных при постоянной температуре, равной  $760^{\circ}\text{C}$ , твердосплавным резцом ВК8, когда заметного образования наростов не наблюдалось. Последним исключалась «разгружающая» заднюю поверхность роль нароста, что позволило оценить превалирование износа по той или иной поверхности на основе соответствующих энергозатрат.

$$a_{\text{мп.п}} = \frac{A_{\text{мп.п}}}{W_{\text{п}}}, \quad (1.7)$$

$$a_{\text{мп.з}} = \frac{A_{\text{мп.з}}}{W_{\text{з}}}. \quad (1.8)$$

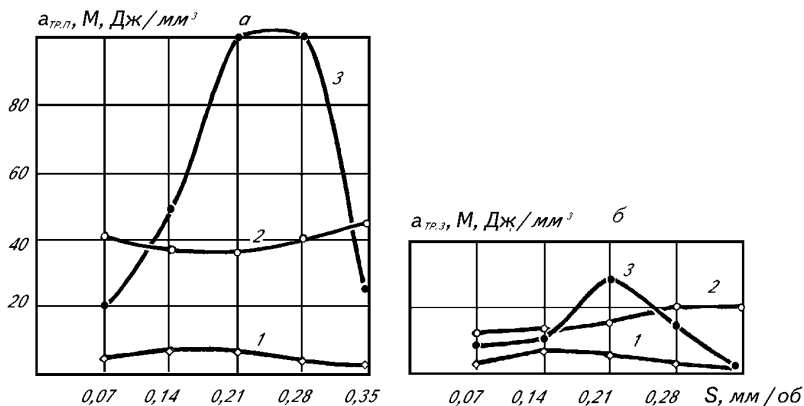


Рисунок 1.10 – Удельная работа износа передней (а) и задней (б) поверхностей резца из ВК8 при точении: 1 – стали 45, 2 – 12Х18Н10Т, 3 – ВТ22 – на режимах, соответствующих постоянной температуре  $\theta = 760^{\circ}\text{C}$ ;  $t = 0,5$  мм

Параметры  $a_{тр.п}$  и  $a_{тр.з}$  являются энергетическими характеристиками износостойкости, так как показывают расход энергии на разрушение единицы объема рабочих поверхностей инструмента в заданных условиях резания. Повышенная величина удельной работы изнашивания указывает на более высокую износостойкость материала. Однако необходимо помнить, что удельная работа изнашивания не является свойством материала, а представляет характеристику триботехнического процесса. Так, один и тот же материал может при различных условиях нагружения характеризоваться разной величиной удельной работы изнашивания. Именно это и наблюдается при сравнительном анализе процессов, протекающих на передней и задней поверхностях инструмента.

При резании стали 45 расход энергии на износ единицы объема по обеим поверхностям практически одинаков (рис. 1.10, кривые 1). Это позволяет считать, что при обработке данной стали в указанных режимах энергетические характеристики процессов, развиваемые на передней и задней поверхностях, стимулируют протекание износа с относительно одинаковой интенсивностью, в результате чего факт превалирования износа по одной из поверхностей практически не наблюдается.

При резании нержавеющей стали (кривые 2) и титанового сплава (кривые 3) расход энергии на износ единицы объема по передней поверхности значительно превышает таковой для задней ( $a_{тр.п} \gg a_{тр.з}$ ). Следовательно, в данном случае будет иметь место превалирование износа по задней поверхности.

Таким образом, оценка износа по затрачиваемой работе позволяет установить методом сравнения причину превалирования износа по одной из поверхностей инструмента.

При обработке нержавеющей стали и титанового сплава это выражается в изменении соотношения работ и сил трения, стимулирующих повышенный (превалирующий) износ инструмента по задней поверхности.

### **1.6. Теплофизическое обоснование эффективности резания с искусственным нагревом**

Трансформация свойств деформируемых объемов стружки, детали и контактных слоев инструмента является неизбежной при резании материалов. Поэтому все способы управления стойкостью инструмента сводятся в конечном счете к созданию условий для максимального упрочнения его контактных слоев и (или) разупрочнения срезаемого слоя.

Одним из главных факторов, определяющих производительность обработки, является скорость резания. Изменение скорости резания приводит к изменению соотношения между работами стружкообразования и трения. При этом влияние скорости резания на все сопутствующие процессы резания имеет двойственную природу. С одной стороны, увеличение скорости резания приводит к росту скорости пластической деформации, вызывая упрочнение материала в зоне стружкообразования и контактных слоях инструмента, с другой стороны – повышению температуры процесса, стимулирующего разупрочнение. Упрочнение с физической точки зрения связано с поглощением внутренней энергии материалом за счет повышения плотности дефектов кристаллического строения, при этом в процессах деформационного упрочнения главную роль отводят линейным дефектам кристаллического строения: дислокациям и дисклинациям. Разупрочнение происходит за счет снижения плотности дефектов кристаллического строения, их перераспределения и развития надкристаллической структуры со своей формой самоорганизации. Процессы разупрочнения определяются исключительно подвижностью дефектов кристаллического строения, активность которого резко возрастает с повышением температуры [14].

Процессы упрочнения и разупрочнения, действуя одновременно, конкурируют между собой, и задача управления процессом резания так или иначе оказывается связанной с целенаправленным воздействием на один из них. Значимость этого вопроса определяется тем, что высокие скорости деформации, в  $10^5$ - $10^6$  раз превышающие развиваемые при стандартных методах испытаний, существенно (при температурах 600-800°C в 2,0-5,0 раз) увеличивают истинные напряжения в контактном слое [6]. Это явление наиболее сильно проявляется при обработке высокопластичных, упрочняемых в процессе деформации нержавеющей и жаропрочных сталей, при резании которых  $\sigma_N$  возрастает до 2\*,  $\sigma_T$  – до 3-4\*, а микротвердость

прирезцовых поверхностях стружек – до 1,5-2,0 раз [8]. Эффективным способом разупрочнения обрабатываемого материала является нагрев, реализация которого лежит в основе интегрированного *резания с дополнительным тепловым воздействием*. Естественно, наиболее эффективен этот метод при обработке труднообрабатываемых (упрочняемых в процессе резания) материалов. Его использование при резании обычных конструкционных сталей, как правило, не дает заметного эффекта и, следовательно, не имеет смысла.

Все существующие способы резания с искусственным нагревом подразделяются условно на объемные и локальные [15, 16]. Объемный нагрев заготовок может производиться специально в печах. Можно подвергать резанию заготовку, получаемую, например, методомковки и находящуюся еще в горячем состоянии, т.е. пока она не остыла от предшествующей операции. Этот случай не требует дополнительных затрат на нагрев материала. Локальные способы нагрева отличаются значительно меньшими энергетическими затратами по сравнению с объемными, но их реализация требует монтажа специальной оснастки на стандартное технологическое оборудование.

При обработке сталей и сплавов, обладающих повышенной пластичностью, одним из эффективных и экономичных способов является резание с электроконтактным нагревом (рис. 1.11). В этом случае локализация вводимого тепла происходит в контактной области, т.е. в срезаемом слое, и разупрочнению подвергаются только его внутренние слои.

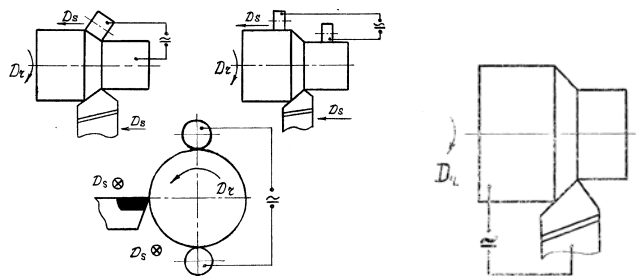


Рисунок 1.11 – Варианты местного (локального) нагрева срезаемого слоя

Оптимизация режимов резания с искусственным нагревом представляет многокритериальную задачу, которую пытаются решать с разных точек зрения. Если за критерий оптимизации принять минимальную прочность обрабатываемого материала, то задача оптимизации сводится к:

$$\sigma = f(\varepsilon, \zeta, T) \rightarrow \min \quad (1.9)$$

$$T < T_{кр},$$

где  $\varepsilon$  – степень и  $\zeta$  – скорость пластической деформации;  $T$  – температура

нагрева обрабатываемого материала;  $T_{кр}$  – температура краснотойкости инструментального материала.

Основным лимитирующим фактором является теплостойкость инструментального материала, ограничивающая верхний допустимый уровень температуры нагрева. Если зависимость  $\sigma = f(\varepsilon, \zeta, T)$  носит монотонный характер, то температура теплостойкости и будет определять предельный режим искусственного нагрева заготовки. При экстремальной зависимости оптимальные условия искусственного нагрева будут соответствовать области минимума.

Рациональную температуру подогрева можно определить в первом приближении по температурной зависимости отношения твердостей инструментального и обрабатываемых материалов [17]. Однако отношение твердостей в реальном процессе контактного взаимодействия резания может сильно отличаться от таковой, снятой в равновесных условиях нагрева.

Величина оптимальной силы тока при контактном нагреве зависит от состояния поверхности, марки обрабатываемого материала, его механических и теплофизических свойств, а также режимов резания. В работе [16] предлагается эмпирическая формула для расчета оптимальной силы тока при обработке титанового сплава BT22:

$$I_{opt} = \frac{256 \cdot 10^7 S^{1,6} t^{0,7}}{V^{4,5}}, \quad (1.10)$$

из которой следует, что с повышением подачи  $S$ , глубины резания  $t$  и уменьшения скорости резания  $V$  оптимальная сила тока возрастает. Расчеты показывают, что рекомендуемые силы тока составляют 50...400 А, при этом повышение температуры достигает до 200<sup>0</sup>С, а требуемая мощность нагревательной системы близка к мощности типовых сварочных агрегатов.

Однако исследования рассматривают только одну – тепловую (разупрочняющую) сторону вопроса. Двойственная же (упрочняющая – разупрочняющая) роль скорости резания не позволяет разделить влияние скоростного и температурного факторов на стойкость инструмента.

Таким образом, разработка методики, позволяющей дифференцированно оценивать влияние скоростного и температурного факторов на показатели процесса резания, может открыть новые пути изучения этого сложного процесса и управления им. Главное требование к подобной методике должно заключаться в обеспечении проведения опытов в условиях изотермического процесса, когда с изменением скорости резания температура контактных поверхностей остается постоянной.

Описанная выше на основе рис. 1.1 методика позволяет реализовать эту задачу путем ввода дозированных величин тепла по следующей схеме (рис. 1.12).

При принятой скорости резания ( $V_n$ ) определяется значение развиваемой

температуры ( $\theta_п$ , °С), которая должна поддерживаться постоянной. С уменьшением скорости до  $V_2$  температура упадет до  $\theta_2$ , °С. Это снижение температуры, равное  $\Delta\theta_2$ , °С, обусловлено уменьшением мощности источника тепла, фактически развиваемого на контактных поверхностях, от  $Q_{к.ф.п}$  до  $Q_{к.ф.2}$ , то есть на величину  $\Delta Q_{к.ф.2}$ . Следовательно, для того, чтобы при  $V_2$  температура равнялась принятой  $\theta_п$ , °С, развиваемой при  $V_п$ , необходимо добавить к мощности источника тепла ( $Q_{к.ф.2}$ ), развиваемого при скорости резания  $V_2$ , теплоту  $\Delta Q_{к.ф.2}$ . Аналогично (введением необходимых величин тепловой энергии  $\Delta Q_{к.ф.2}$ ) достигается заданное значение температуры при любой другой скорости резания –  $V_x$  (естественно, начальные условия опытов должны оставаться постоянными в пределах каждой серии).

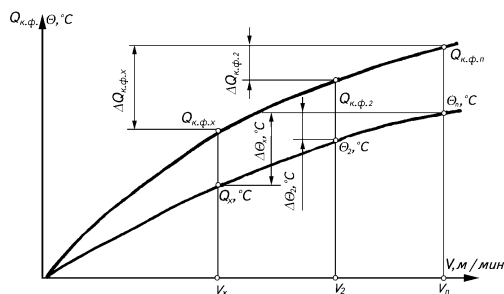


Рисунок 1.12 – Схема обоснования резания с постоянной температурой при изменяющейся скорости

На рис. 1.13 и 1.14 представлены результаты стойкостных опытов, полученные при резании различных материалов в режиме постоянной температуры (кривые 2). Здесь же приведены температурные зависимости, отражающие обычные условия резания (кривые 3) и значения тепловой энергии ( $Q_{вв}$ ), введенные при соответствующих скоростях резания для поддержания температуры постоянной, равной во всех опытах при резании инструментом из быстрорежущей стали Р6М5 – 600°С, твердым сплавом ВК8 – 805°С. При этом прогнозируется возможность уточнения степени влияния скорости резания на стойкость в зависимости от деформационных характеристик исследуемых материалов.

Стойкостные зависимости (кривые 1), полученные в обычных условиях резания, приводятся для сравнительного анализа с этих позиций. По этой же причине начальные условия во всех опытах приняты одинаковыми.

Анализ полученных результатов показывает, что стойкость инструмента в значительной мере зависит (при прочих равных условиях) не только от температуры резания, но и скорости как бестемпературного фактора, обуславливающего упрочнение срезаемого слоя и его контактных поверхностей.

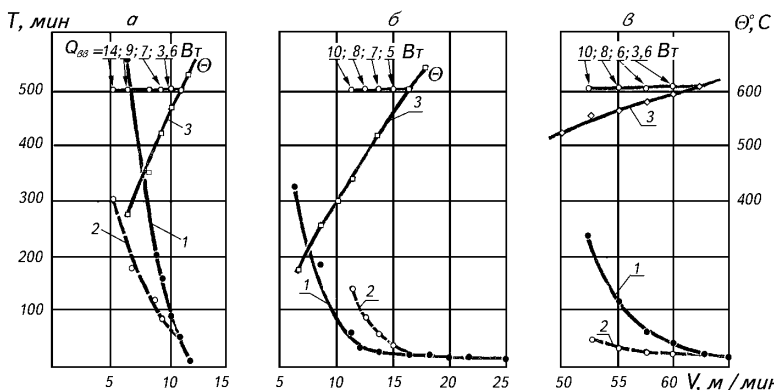


Рисунок 1.13 – Влияние скорости резания на температуру и стойкость реза из P6M5 при точении: а – BT22; б – 12X18H10T; в – стали 45;  $t = 0,5$  мм;  $S = 0,21$  мм/об;  $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = \alpha_1 = 12^\circ$ ,  $\varphi = \varphi_1 = 45^\circ$ . 1 – обычное резание; 2 – резание при постоянной температуре, равной  $600^\circ\text{C}$ ; 3 –  $\Theta$ ,  $^\circ\text{C} = f(V)$  обычное резание; количество введенного тепла при каждой скорости обозначено стрелками

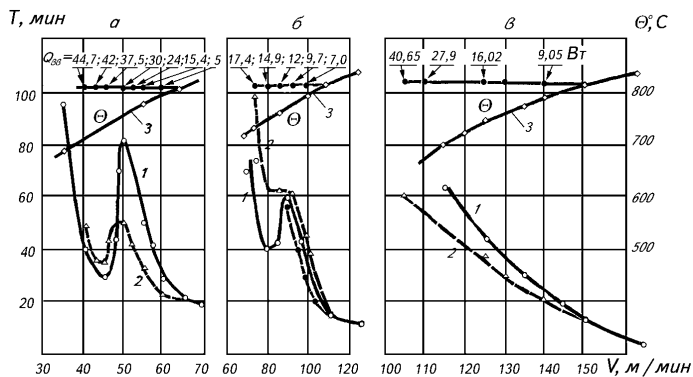


Рисунок 1.14 – Влияние скорости резания на температуру и стойкость реза из BK8 при точении: а – BT22; б – 12X18H10T; в – стали 45;  $t = 0,5$  мм;  $S = 0,21$  мм/об;  $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = \alpha_1 = 12^\circ$ ,  $\varphi = \varphi_1 = 45^\circ$ . 1 – обычное резание; 2 – резание при постоянной температуре, равной  $805^\circ\text{C}$ ; 3 –  $\Theta$ ,  $^\circ\text{C} = f(V)$  обычное резание; 4 –  $T = f(V)$  при постоянной ( $740^\circ\text{C}$ ) температуре, поддерживаемой внутренним охлаждением реза: Количество введенного тепла при каждой скорости обозначено стрелками

При этом действие скорости резания как скоростного (бестемпературного) фактора связано, главным образом, с ее влиянием на процессы вторичных деформаций контактных слоев обрабатываемой поверхности и стружки. Во всех опытах при резании в режиме постоянной температуры (кривые 2) влияние скоростного фактора на стойкость инструмента однозначно.

Независимо от свойств исследованных материалов уменьшение скорости вызывает существенное повышение стойкости (соответственно и пути  $I = V \cdot T$ ), воспроизводя качественно общий характер зависимости  $T = f(V)$  в обычных условиях резания. Так как в опытах (кривые 2) температура и другие условия оставались неизменными, столь резкое влияние скоростного фактора на стойкость можно объяснить в основном двумя причинами, обусловленными кинетикой деформационных процессов. С уменьшением скорости резания, во-первых, соответственно падает степень упрочнения контактных поверхностей срезаемого слоя, во-вторых, увеличивается время контактирования, обуславливающее более полное протекание разупрочняющих процессов. Оба процесса действуют в одном направлении, что и вызывает столь резкое изменение стойкости с изменением скорости резания в условиях изотермического процесса. Эффект влияния скоростного фактора на стойкость существенно зависит от пластичности материала – его способности к упрочнению в процессе деформации. Так, трехкратное увеличение стойкости (при резании в режиме постоянной температуры, см. рис. 1.13 а, в, кривые 2) достигается при резании стали 45 уменьшением скорости на 16,1%, а малопластичного титанового сплава BT22 – на 55%. Аналогичные результаты получены при резании указанных материалов твердосплавным инструментом в режиме постоянной (равной 805°С) температуры (см. рис. 1.14 а, в, кривые 2).

Наиболее существенной является роль скоростного фактора при резании высокопластичной нержавеющей стали 12Х18Н10Т. При этом дополнительный нагрев обуславливает 2–3-кратное повышение стойкости при резании как инструментом из быстрорежущей стали (рис. 1.13 б), так и твердосплавным (см. рис. 1.14 б). Значительная роль скорости резания в изменении стойкости как скоростного бестемпературного фактора подтверждается также опытами по поддержанию температуры резания постоянной за счет внутреннего охлаждения резца (проверка эффекта искусственного нагрева постановкой обратной задачи – охлаждением). Опыты проводились следующим образом. Была выбрана скорость резания – 90 м/мин, при которой температура составляет 740°С. С увеличением скорости резания данная температура поддерживалась неизменной путем регулирования расхода воды, подаваемой во внутренние полости резца. Материал инструмента, его геометрические параметры и все другие начальные условия опытов оставались такими же, как и при проведении

обычных стойкостных испытаний с искусственным нагревом. Полученные данные (рис. 1.14 б, кривая 4) показали, что при резании с поддержанием температуры постоянной путем охлаждения так же, как и с искусственным нагревом, стойкость инструмента с увеличением скорости резко снижается, то есть самостоятельная (бестемпературная) роль скоростного фактора в изменении стойкости очевидна.

Факт повышения стойкости твердосплавного инструмента с помощью искусственного нагрева широко известен. Возможность же повышения стойкости инструмента из быстрорежущей стали, чрезвычайно чувствительного к тепловым воздействиям, искусственным нагревом получена впервые.

Как известно, способность материала к упрочнению оценивается величиной отношения предела текучести к пределу прочности  $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ . Чем меньше эта величина, тем более пластичен материал. Для нержавеющей стали она составляет 0,40...0,45, для конструкционных сталей – 0,60...0,65. По расчетам Т.Н. Лоладзе [17], твердость в зоне стружкообразования, значительно превышает статическую твердость стружки и тем более основного материала. При этом для стали 1Х18Н9Т увеличение температуры от 400°С до 600°С (условие наших опытов) привело к снижению модифицированной твердости стружки от 380 до 330 единиц, или на 13%, в то время как статическая твердость снизилась от 325 до 180 единиц, или на 45%, то есть влияние скоростного фактора на упрочнение весьма существенно.

Таким образом, скоростной фактор, интенсифицирующий повышенное упрочнение высокодеформируемой стали 12Х18Н10Т, является одной из основных причин снижения стойкости инструмента. Влияние этого фактора столь значительно, что искусственным нагревом, стимулирующим разупрочнение, удастся повысить стойкость даже инструмента из быстрорежущей стали, очень чувствительного к температурным воздействиям.

В таблице 1.3 приведены значения микротвердости внутренней поверхности стружки при точении нержавеющей стали с искусственным нагревом и без нее.

Конечно, микротвердость стружки, измеренная по завершении процесса резания, не может в полной мере характеризовать ее состояние в динамическом контактном взаимодействии. Но, если учесть, что нержавеющая сталь имеет аустенитную структуру и обладает низкой температурной чувствительностью, при охлаждении до комнатной температуры она не будет подвержена значительным полиморфным превращениям [19]. Поэтому представленные в таблице 1.3 результаты могут объективно отражать качественную картину процесса.

Таблица 1.3 – Микротвердость прирезцовый поверхности стружки при точении 12Х18Н10Т

Инструментальный материал	Р6М5			ВК8		
	12	18	80	110		
Скорость резания, м/мин	450	600*	600	750	805*	805
Температура резания, °С	18,0	24,0	24,0	78,0	95	95
Суммарный тепловой поток на контактной поверхности, Вт/мм <sup>2</sup>	3040	2330	4360	3050	2800	3680
Микротвердость, МПа						

\* Резание с искусственным нагревом

Конечно, микротвердость стружки, измеренная по завершении процесса резания, не может в полной мере характеризовать ее состояние в динамическом контактно-взаимодействии. Но, если учесть, чтоержавеющая сталь имеет аустенитную структуру и обладает низкой температурной чувствительностью, при охлаждении до комнатной температуры она не будет подвержена значительным полиморфным превращениям [19]. Поэтому представленные в таблице 1.3 результаты могут объективно отражать качественную картину процесса.

Анализ полученных результатов показывает, что с увеличением скорости резания микротвердость стружки возрастает как результат более высокой степени пластической деформации и соответствующего деформационного упрочнения. Искусственный нагрев приводит к ощутимому снижению микротвердости, которая в большей степени проявляется при резании быстрорежущим инструментом.

Так, с увеличением скорости резания в диапазоне низких (от 12 до 18 м/мин) и высоких (от 80 до 110 м/мин) значений, несмотря на одновременное повышение температуры, микротвердость стружки увеличивается: от 3040 до 4360 МПа при резании резцом из стали Р6М5 и от 3050 до 3680 МПа из твердого сплава ВК8. Это означает, что в условиях приведенных режимов с увеличением скорости резания преобладают процессы упрочнения контактных слоев стружки. Искусственный нагрев, естественно, стимулирует процессы разупрочнения, и микротвердость контактных слоев стружки значительно снижается. При скоростях 12 и 80 м/мин снижение микротвердости за счет введения джоулева тепла составило соответственно 710 и 250 МПа, что и обусловило повышение стойкости (сравним кривые 1 и 2 на рис. 1.13, б и 1.14, б). При этом эффект повышения стойкости зависит от уровня снижения микротвердости (при  $V = 12$  м/мин прирост стойкости выше, чем при  $V = 80$  м/мин).

Обобщая изложенное, можно заключить, что при обработке высокопластичных материалов эффективным способом повышения стойкости

является электроконтактный нагрев зоны резания малой мощности, реализация которого требует значительно меньших (на порядок) энергетических затрат по сравнению с режимами традиционного искусственного нагрева.

Эффективность предлагаемого способа ощутима при обработке высокопластичных материалов, наиболее склонных к деформационному упрочнению. Среди большого многообразия схем резания встречаются такие, для которых высокая степень пластической деформации срезаемого слоя имеет место даже при обработке сплавов нормальной обрабатываемости. Типичным примером такой обработки является развертывание. Высокая степень пластической деформации стружки в этом случае вызвана двумя основными причинами. Во-первых, малой толщиной снимаемого слоя, соизмеримой с радиусом скругления режущего клина, в результате чего процесс стружкообразования реализуется при отрицательных передних углах резания и малых углах сдвига. Во-вторых, из-за малой толщины среза зона вторичных пластических деформаций охватывает большую часть сечения стружки. Эти два фактора действуют в одном направлении, вызывая повышение степени пластической деформации снимаемого слоя.

Развертки относятся к прецизионному инструменту и низкие скорости резания при развертывании не обеспечивают оптимальные тепловые условия эксплуатации твердого сплава. В результате рабочие поверхности твердосплавной развертки подвергаются интенсивному разрушению за счет хрупкого выкрашивания и абразивного изнашивания.

На рисунке 1.15 представлены результаты исследований при развертывании отверстий в различных материалах твердосплавными развертками из ВК8.

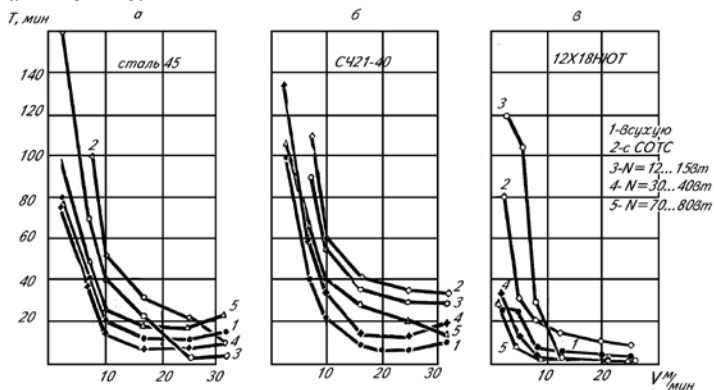


Рисунок 1.15 – Влияние искусственного нагрева на стойкость разверток из ВК8 ( $d = 10$  мм,  $S = 0,05$  мм/об,  $t = 0,15$  мм)

Во всех опытах путем подбора соответствующих значений мощностей искусственно вводимого тепла удается в 2...3 раза повысить стойкость разверток по сравнению с резанием всухую. Наибольший эффект отмечается при обработке нержавеющей стали. В этом случае стойкость разверток существенно повышается даже по сравнению с резанием с использованием СОТС.

Искусственный нагрев разупрочняет контактные поверхности срезаемого слоя и создает более благоприятные температурные условия для эксплуатации инструмента, повышая пластичность твердого сплава.

Металлографическим анализом установлено, что при искусственном нагреве меняется механизм изнашивания твердосплавной развертки в результате перехода от хрупкого выкрашивания к адгезионному изнашиванию [4]. Характерно, расход энергии в оптимальных условиях не превышает 40 Вт, то есть требуемой для подачи СОТС величины. При этом повышенное влияние контактных процессов на общую работу резания при развертывании обуславливает воздействие электроконтактного нагрева и на точностные параметры отверстия, снижая колебания усилий и стабилизируя процесс в целом.

Одним из основных вопросов при резании с искусственным нагревом является поиск оптимальной температуры нагрева, устанавливаемой, как правило, на основе трудоемких опытов.

Изложенная методика решает сложный вопрос поиска оптимальной температуры при резании с искусственным подогревом, исключая необходимость проведения трудоемких экспериментов.

1. Существующими методами измерения температуры определяется предельная скорость резания, соответствующая температуре теплостойкости инструмента.

2. Снижается скорость резания и, согласно описанной методике, вводятся потребные для развития установленной температуры теплостойкости величины джоулеа тепла. При этом факт увеличения эффекта искусственного нагрева с понижением скорости резания позволяет задавать необходимые значения скоростей с учетом особенностей данной операции – потребностью в повышенных режимах или периоде стойкости.

### **1.7. Энергетические характеристики процесса резания полимерных композитов**

В подразделе приводятся результаты, полученные на основе экспериментального исследования влияния условий резания на энергозатраты процесса резания полимерных композитов, и влияния энергетических характеристик процесса на параметры качества поверхностного слоя волокнистого полимерного композита, обработанного резанием [20].

В качестве энергетических характеристик процесса резания рассматривались: секундная работа, затрачиваемая на резание  $A$ , и удельная

энергия воздействия контактных поверхностей инструмента на отдельный слой – е.

Секундная работа, затрачиваемая на резание, состоит из суммы работ, затрачиваемых на деформирование, трение по передней и задней поверхности инструмента.

$$A = A_{\text{деф}} + A_{\text{мп}\gamma} + A_{\text{мп}\alpha} ; \quad \text{H} \cdot \text{м} / \text{с} \quad (1.11)$$

Составляющие работы вычислялись по известным зависимостям с использованием полученных экспериментально значений составляющих силы резания  $P_z$  и  $P_y$ . При этом использовали схему действия составляющих силы резания в соответствии с рисунком 1.16

$$A_{\text{деф}} = P_1 \cdot V \cdot \frac{\cos(\omega + \beta) \cdot \cos \gamma}{\cos \omega \cdot \cos(\beta - \gamma)}, \quad \text{H} \cdot \text{м} / \text{с} \quad (1.12)$$

$$A_{\text{мп}\gamma} = P_1 \cdot V \cdot \frac{\sin(\omega + \gamma)}{\cos \omega}, \quad \text{H} \cdot \text{м} / \text{с} \quad (1.13)$$

$$A_{\text{мп}\alpha} = F_\alpha \cdot V, \quad \text{H} \cdot \text{м} / \text{с} \quad (1.14)$$

где:  $P_1$  – проекция силы стружкообразования  $R_y$  на ось z;  $\beta$  – угол сдвига;  $F_\alpha$  – касательная составляющая, действующая на задней поверхности.

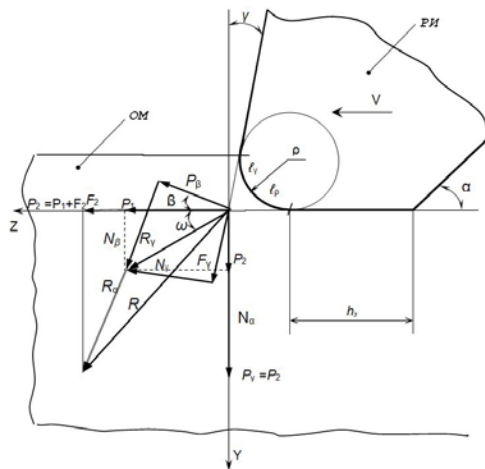


Рисунок 1.16 – Схема действия силы резания и её составляющих  
[по Розенбергу А.М.]

Из схемы действия сил при ортогональном резании следует, что измеряемые динамометром технологические составляющие  $P_z$  и  $P_y$  функционально связаны с физическими составляющими: касательными  $F_\gamma$  и  $F_\alpha$  и нормальными  $N_\gamma$  и  $N_\alpha$ , действующими на передней и задней поверхностях инструмента, и силами  $P_\beta$  и  $N_\beta$ , действующими в условной плоскости сдвига,  $P_1$  и  $P_2$  – проекции стружкообразования  $R_\gamma$  на оси  $z$  и  $y$ .

Нормальную силу и силу трения по передней поверхности  $N_\gamma$  и  $F_\gamma$ , а также проекции силы стружкообразования на оси  $z$  и  $y$ , получили в результате системы уравнений

$$P_z = P_1 + F_\alpha = N_\gamma \cdot \cos \gamma + F_\gamma \cdot \sin \gamma + F_\alpha, \quad H \quad (1.15)$$

$$P_y = P_2 + N_\alpha = F_\gamma \cdot \cos \gamma - N_\gamma \cdot \sin \gamma + N_\alpha, \quad H \quad (1.16)$$

При этом, технологические составляющие силы резания  $P_z$  и  $P_y$  измерялись экспериментально с помощью универсального динамометра УДМ, а нормальную силу и силу трения по задней поверхности  $N_\alpha$  и  $F_\alpha$  находили с помощью известной методики А.М. Розенберга путем экстраполяции составляющих силы резания  $P_z$  и  $P_y$  на нулевую толщину среза (рис. 1.16)

Значение угла  $\omega$  определялось отношением проекций силы стружкообразования  $P_1$  и  $P_2$ :

$$\frac{P_1}{P_2} = \operatorname{ctg} \omega \quad (1.17)$$

Удельную энергию воздействия контактных поверхностей инструмента на отделяемый слой  $e$ , определяли как отношение произведения скорости резания на проекцию силы стружкообразования на ось  $z$  –  $P_1$  к площади контакта режущего инструмента с отделяемым слоем:

$$e = \frac{P_1 \cdot V}{S} \quad (1.18)$$

Площадь контакта  $S$  определяли как произведение ширины среза –  $b$  на длину контакта  $l_\gamma + l_\rho$  (рисунок 1.15)

Если согласно рисунку 1.15

$$l_\gamma = \frac{a - \rho}{\cos \gamma} \quad a \quad l_\rho = \frac{2\pi\rho \cdot 90^\circ}{360^\circ} = 1,57\rho$$

то

$$S = b \left( \frac{a - \rho}{\cos \gamma} + 1,57\rho \right), \quad (1.19)$$

где:  $b$  – ширина среза,  $a$  – толщина среза,  $\rho$  – радиус округления режущей кромки,  $\gamma$  – передний угол,  $S$  – площадь контакта режущего инструмента с отделенным слоем.

Подставим выражение (1.19) в формулу (1.18),

$$e = \frac{P_1 \cdot V \cdot \cos \gamma}{b \cdot [a + \rho(1,57 \cos \gamma - 1)]}, \quad \text{Дж} / \text{мм}^2 \cdot \text{с} \quad (1.20)$$

Значение  $v$ ,  $\gamma^0$ ,  $b$ ,  $a$ ,  $\rho$  – задаются в исходных данных, а  $P_1$  определяется из системы уравнений (1.15, 1.16)

Коэффициент внешнего трения по передней и по задней поверхностям инструмента устанавливали, как это принято в резании материалов, по закону Амонтона, исходя из найденных нормальных и касательных сил, действующих на этих поверхностях:

$$\mu_\gamma = \frac{F_\gamma}{N_\gamma} \quad \text{и} \quad \mu_\alpha = \frac{F_\alpha}{N_\alpha} \quad (1.21)$$

где  $F_\gamma = P_1 \frac{\sin(\omega + \gamma)}{\cos \omega}$ ;  $N_\gamma = P_1 \frac{\cos(\omega + \gamma)}{\cos \omega}$

$F_\gamma$  и  $F_\alpha$ ;  $N_\gamma$  и  $N_\alpha$  – силы трения и нормальные силы на передней и задней поверхностях инструмента.

На энергозатраты при резании наибольшее влияние оказывают: фактическая площадь контакта по задней поверхности, толщина среза, радиус округления режущей кромки, угол наклона главной режущей кромки и скорость резания. Причем для различных диапазонов режимов резания степень влияния этих параметров различна.

Опыты и соответствующие расчеты проводились для принятых постоянных условий резания.

#### Скорость резания.

Влияние скорости резания на энергозатраты при резании и удельную энергию резания приведены на рисунке 1.17.

Снижение энергозатрат при увеличении скорости резания очевидно связано с несколькими факторами. С увеличением скорости резания снижается предел прочности композита и величина деформации, при которой происходит разрушение.

Первое приводит к уменьшению нормальной силы на передней поверхности, а второе (увеличение хрупкости разрушения) способствует уменьшению фактической площади контакта по задней поверхности и, следовательно, силы трения по задней поверхности и температуры резания. Отмечается также незначительное снижение силы трения по передней поверхности за счет увеличения степени диспергирования стружки.

В диапазоне скоростей резания от 1 до 10 м/с с увеличением скорости повышается и температура в зоне резания, что приводит к увеличению степени деструктирования полимера и снижению силы трения за счет воздействия поверхностно активных веществ.

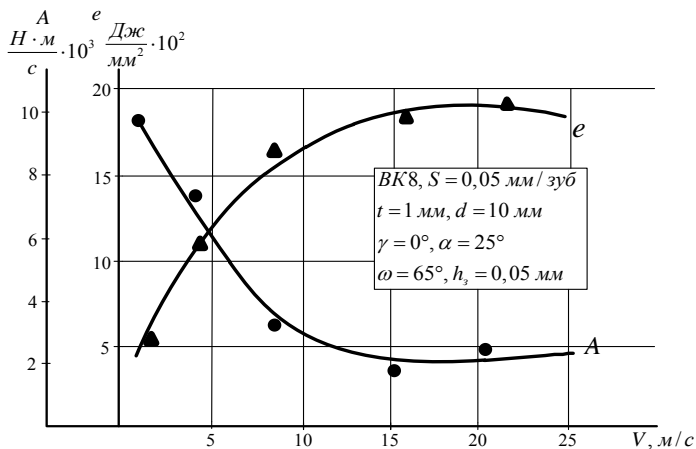


Рисунок 1.17 – Зависимость энергозатрат и удельной энергии резания от скорости резания при фрезеровании стеклоорганопластика

Таким образом, с увеличением скорости резания отмечается снижение всех составляющих секундной работы резания: работы деформации и работ трения по передней и задней поверхностях, хотя они и имеют различную природу в разных диапазонах скоростей резания.

Увеличение скорости резания способствует увеличению удельной энергии резания (зависимость имеет параболический характер), которая способствует снижению релаксации напряжений вглубь материала (подтверждается уменьшением глубины дефектного слоя).

Косвенным объяснением зависимостей по рисунку 1.17 может служить увеличение скорости распространения трещин в композите с увеличением скорости резания. Уменьшение удельной энергии резания и увеличение энергозатрат при достижении  $V \approx 15 \text{ м/с} \div 18 \text{ м/с}$  очевидно соответствует достижению предельной ( $\approx 545 \text{ м/с}$ ) скорости распространения трещин в стеклоорганопластике. При достижении скорости подводимой кинетической энергии становится достаточно не только для продвижения магистральной опережающей трещины, но и для роста трещин вглубь обрабатываемого материала.

#### Толщина среза

Уменьшение толщины среза (при постоянной ширине) способствует уменьшению энергозатрат и увеличению удельной энергии резания (рис. 1.18).

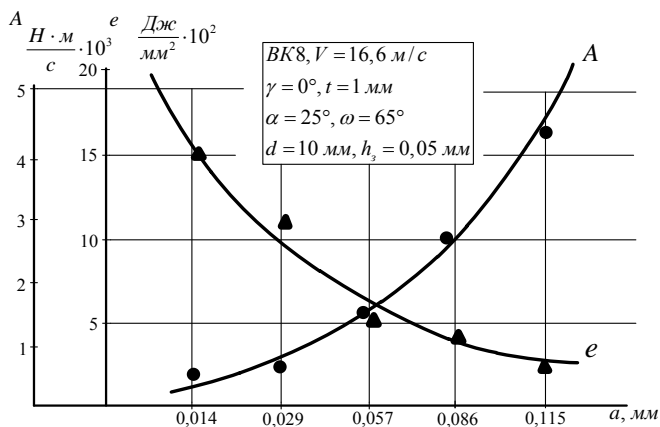


Рисунок 1.18 – Зависимость секундной работы и удельной энергии резания от толщины среза при фрезеровании стеклоорганопластика

Малая толщина среза приводит к эффекту взаимодействия отражённых волн и увеличению числа микротрещин в зоне нагружения, при этом зона разрушения материала находится в плоско-напряжённом состоянии.

Это способствует уменьшению значения динамического коэффициента интенсивности напряжений старта трещины и снижению энергетических затрат на процесс резания. Уменьшение толщины среза способствует уменьшению сечения среза и увеличению удельной энергии резания.

Величина износа по задней поверхности и радиус округления режущей кромки.

Величина износа по задней поверхности и радиус округления режущей кромки оказывают совместное влияние на энергозатраты и удельную энергию резания, поскольку связаны между собой простой зависимостью

$$\rho = \rho_0 + k \cdot h_3 \quad (1.22)$$

где  $k$  – коэффициент, зависящий от обрабатываемого и инструментального материала, а также от вида обработки; для фрезерования стеклоорганопластика фрезой с материалом режущей части из ВК8  $k = 0,25 \div 0,28$ .

С увеличением износа наблюдается увеличение энергозатрат (рис. 1.19), что объясняется ростом силы трения на задней поверхности за счет увеличения фактической площади контакта и уменьшение удельной энергии резания за счет увеличения площади контакта по режущей кромке.

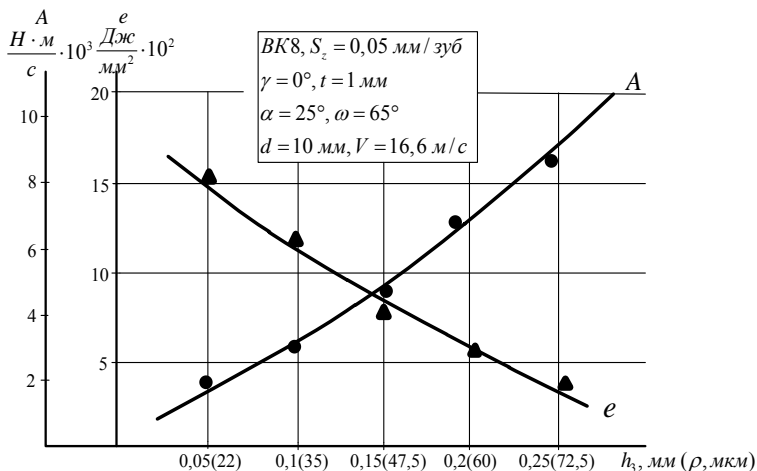


Рисунок 1.19 – Зависимость энергосъёмов и удельной энергии резания от величины износа при фрезеровании стеклоорганоластика  
Величина заднего угла.

Увеличение заднего угла приводит к уменьшению фактической площади контакта инструмента по задней поверхности и, следовательно, сил на задней поверхности инструмента, что в свою очередь способствует уменьшению энергосъёмов на процесс резания (рис. 1.20).

Варьирование заднего угла практически не оказывает влияния на удельную энергию резания в силу слабого изменения напряжений сжатия в плоскости резания. Это подтверждается незначительным снижением главной составляющей силы резания за счёт снижения силы трения на задней поверхности.

Угол наклона главной режущей кромки

Увеличение угла наклона главной режущей кромки способствует уменьшению нормальных  $\sigma_i$  напряжений в направлении главного движения. Разрушение материала происходит за счёт достижения касательными напряжениями предела прочности на срез. Увеличение угла наклона главной режущей кромки сопровождается заметным снижением главной составляющей силы резания и, следовательно, энергосъёмов резания (рис. 1.21).

Увеличение угла наклона главной режущей кромки даёт возможность осуществлять тонкие срезы обрабатываемого материала, что способствует уменьшению динамического коэффициента интенсивности напряжений старта трещины и снижению энергетических затрат на процесс резания.

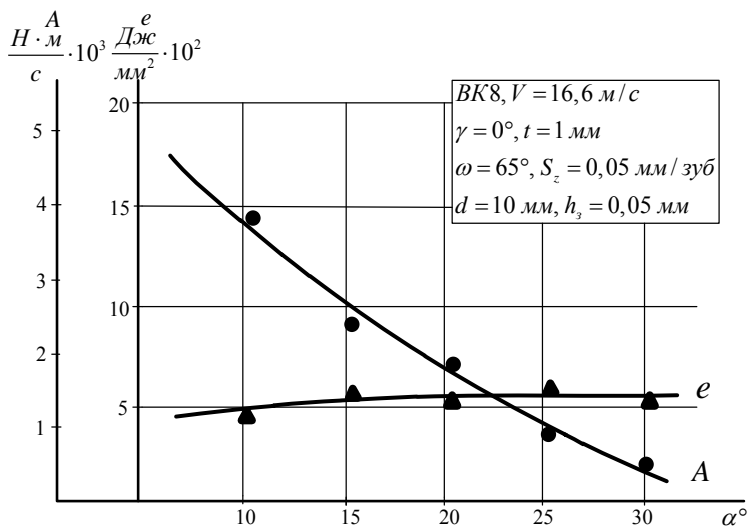


Рисунок 1.20 – Зависимость секундной работы и удельной энергии резания от величины заднего угла

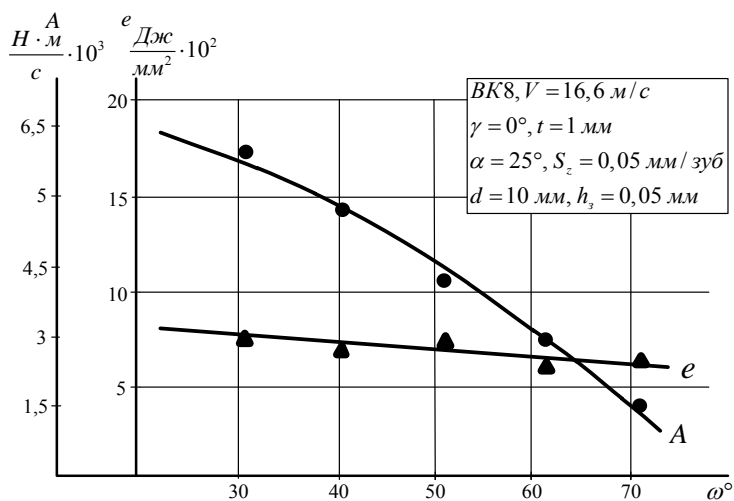


Рисунок 1.21 – Зависимость энергозатрат и удельной энергии резания при фрезеровании стеклоорганоластика от величины угла наклона главной режущей кромки

Незначительное уменьшение удельной энергии резания связано с увеличением площади контакта режущей кромки и прикромочных участков передней поверхности с обрабатываемым материалом.

При определении влияния энергетических характеристик процесса резания на выходные параметры качества для повышения достоверности определения степени их влияния рассматривали одни и те же значения секундной работы, затрачиваемой на резание и удельной энергии резания при различных условиях обработки.

Степень деструкции полимерных составляющих композита определяли по количеству стабильных макрорадикалов с помощью электронного парамагнитного резонанса; глубину дефектного слоя определяли по известной методике; количество несрезанных волокон на обработанной поверхности определяли с помощью известного планиметрического метода соотношения фаз; шероховатость обработанной поверхности оценивали по стандартной методике.

Основной вид обработки, для которого проводилось исследование – фрезерование. Контрольные опыты для установления общих закономерностей проводились для точения и сверления. Диапазоны значений параметров, составляющих условия обработки, приведены в табл. 1.4.

Диапазоны изменения значений выходных параметров качества обработки волокнистых полимерных композитов приведены в табл. 1.5.

Секундную работу, затрачиваемую на резание, при изменении условий резания в вышеупомянутых диапазонах удалось изменить в пределах  $(1 \div 7)$

$10^3 \frac{H \cdot M}{с}$ , удельную энергию резания в пределах  $(1 \div 20) 10^2$  Дж/мм<sup>2</sup>.

Зависимости выходных параметров качества обработки волокнистых полимерных композитов от энергетических характеристик процесса резания приведены на графиках (рис. 1.22 и 1.23).

Очевидно, что влияние энергетических характеристик процесса резания на выходные параметры качества обработки происходит косвенно через параметры процесса резания. Однако анализ приведённых зависимостей позволяет сделать вывод о наличии закономерностей, характеризующих уменьшение энергозатрат на процесс обработки и увеличения удельной энергии резания. При этом все исследуемые параметры качества обработки волокнистых полимерных композиционных материалов имеют тенденцию к улучшению. Это можно пояснить особенностями свойств полимерных композитов и их изменений при различных условиях обработки.

Увеличение удельной энергии воздействия контактных поверхностей инструмента на единичные волокна и микрообъемы матрицы способствует изменению условий релаксации напряжений, минимизируя влияние механического фактора на процесс разрушения композита по поверхности раздела.

Таблица 1.4 – Диапазоны значений параметров, в пределах которых проводилось исследование (процесс фрезерования)

<b>№ п/п</b>	<b>Название параметра и обозначение</b>	<b>Размерность</b>	<b>Пределы изменения</b>
1.	Скорость резания – V	м/с	1 ÷ 30
2.	Подача – S <sub>2</sub>	мм/зуб	0,01 ÷ 0,5
3.	Глубина резания - t	мм	1 ÷ 10
4.	Ширина фрезерования - B	мм	2 ÷ 30
5.	Диаметр фрезы - D	мм	6 ÷ 250
6.	Число зубьев фрезы - Z	шт	2 ÷ 36
7.	Передний угол - γ	град.	-10+20
8.	Задний угол - α	град.	10 ÷ 30
9.	Угол наклона винтового зуба – ω	град.	10 ÷ 70
10.	Радиус округления режущей кромки - ρ	мкм	5 ÷ 80
11.	Величина износа по задней поверхности - h <sub>з</sub>	мм	0,05 ÷ 1,0
12.	Шероховатость прикромочных участков задней и передней поверхностей - R <sub>a</sub>	мкм	0,08 ÷ 10
13.	Инструментальный материал - ИМ	-	ВК8
14.	Обрабатываемый материал - ОМ	-	стеклопластик, стеклооргано-пластик, углеоргано-пластик, органопластик

Таблица 1.5 – Диапазоны изменения значений выходных параметров качества обработки при изменении энергетических параметров процесс резания

№ п/п	Исследуемый параметр качества	Диапазон измерения и размерность	Погрешность оценки
1	Шероховатость - $R_z$	(2 ÷ 100) мкм	±10%
2	Ворсистость - $K_B$	(0 ÷ 100)%	±5%
3	Степень деструкции полимера - $N$	$(10^{12} \div 10^{12}) \frac{\text{спин}}{2}$	±10%
4	Глубина дефектного слоя - $H$	(40 ÷ 400) мкм	±10%

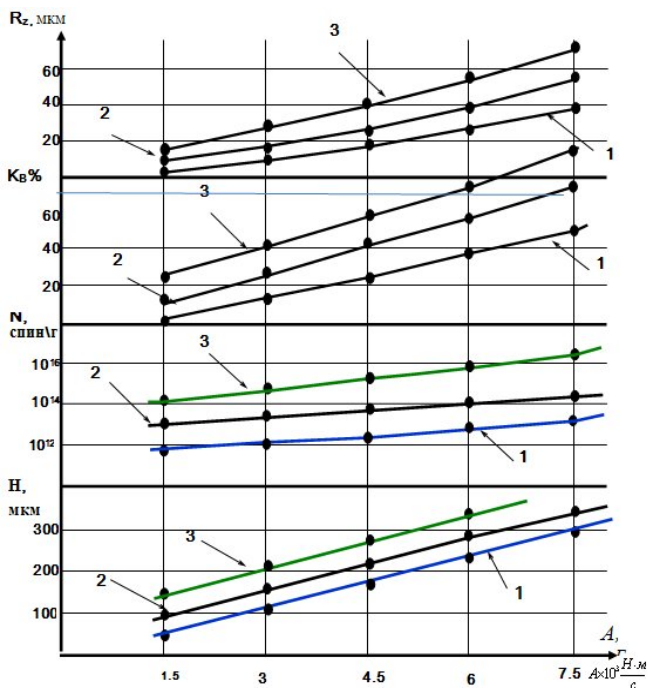


Рисунок 1.22 – Зависимость выходных параметров качества обработки волокнистых композитов от энергетических затрат процесса резания при фрезеровании:

1 – стеклопластика, 2 – стеклоорганопластика, 3 – органопластика

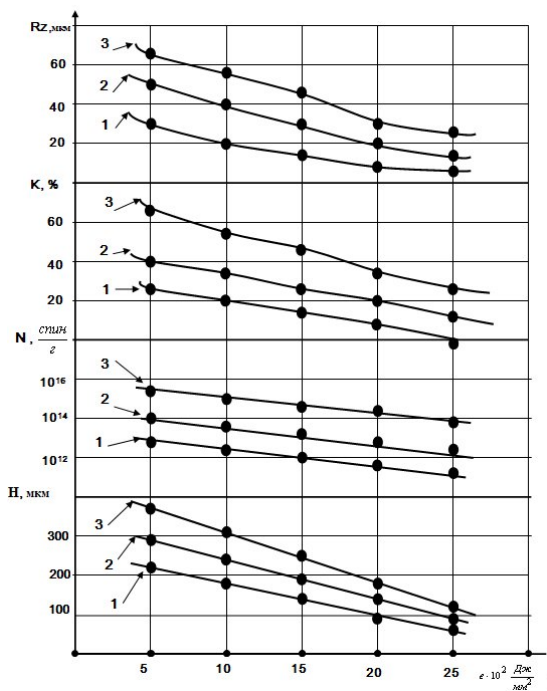


Рисунок 1.23 – Зависимость выходных параметров качества обработки волокнистых композитов от удельной энергии резания при фрезеровании: 1 – стеклопластика, 2 – стеклоорганиопластика, 3 – органиопластика

Это сопровождается уменьшением глубины дефектного слоя, ворсистости, шероховатости обработанной поверхности. Увеличение удельной энергии способствует также повышению хрупкости разрушения, снижению работы пластической деформации и температуры резания, что снижает влияние теплового и химического факторов.

Процесс разрушения по поверхности раздела приводит к снижению степени деструкции полимерных составляющих композита.

Уменьшение величины деформации, при которой происходит разрушение, сопровождается уменьшением фактической площади контакта по задней поверхности.

Уменьшение разрушающего напряжения обеспечивается снижением сил резания на задней поверхности и локализации распространения трещин по поверхности раздела. Этот процесс сопровождается снижением затрат на резание.

Анализ результатов исследования позволяет показать основные пути снижения энергозатрат при резании: увеличение скорости деформирования, уменьшение толщины среза, уменьшение сил на задней поверхности инструмента, уменьшение радиуса округления режущей кромки, увеличение угла наклона главной режущей кромки. Перечисленные факторы обеспечивают также рост удельной энергии воздействия контактных поверхностей инструмента на микрообъёме композита, что обеспечивает условия резания, минимизирующие влияние механического, теплового, и химического факторов на разрушение композита по поверхности раздела.

Анализируя изложенное в подразделе приходим к выводу что:

- с увеличением скорости деформирования и снижением температуры в зоне разрушения снижается ударная вязкость композита и энергия разрушения (энергозатраты на разрушение) и повышается хрупкость разрушения за счёт увеличения отношения работы упругой деформации к работе распространения трещин;

- наибольшее влияние на силу резания при обработке волокнистых полимерных композитов оказывает величина износа инструмента по задней поверхности и увеличение радиуса округления режущей кромки, параметры среза, величина заднего угла. Скорость резания оказывает заметное влияние на силу резания в диапазонах более 10 ÷ 15 м/с. При этом степень влияния остальных параметров снижается за счёт изменения физико-механических и тепло физических свойств обрабатываемого материала;

- с увеличением удельной энергии резания улучшаются выходные параметры качества обработки композита за счет:

- изменения условий релаксации напряжений и минимизации влияния механического фактора на процесс разрушения композита на поверхности раздела;

- увеличения ударной вязкости полимерных составляющих, снижения работы пластической деформации и температуры резания, что снижает влияние теплового и химического фактора на процесс разрушения по поверхности раздела, снижения степени деструкции полимера;

- увеличения величины разрушающего напряжения и величины деформации, при которой происходит разрушение по поверхности раздела структурных компонентов композита.

- снижение энергозатрат на резание в сочетании с увеличением удельной энергии воздействия режущего клина на отделяемый слой способствует минимизации влияния механического, теплового и химического факторов на разрушение композита по поверхностям раздела структурных компонентов.

В работе предлагаются пути снижения энергозатрат и увеличения удельной энергии при обработке полимерных композиционных материалов: увеличение скорости деформирования при резании, уменьшение фактической площади контакта режущего инструмента с обрабатываемым материалом, снижение сил на задней поверхности инструмента.

***Вопросы для самостоятельного контроля***

1. Покажите источники и приемники, обеспечивающие теплоэнергобаланс процесса резания.
2. В чем суть и методика экспериментального определения мощности теплового потока, фактически (с учетом теплообмена) развиваемого на контактных поверхностях инструмента –  $Q_{к.ф.}$ ?
3. Начертите схему установки для определения  $Q_{к.ф.}$ ?
4. Какова цель проведения исследований процесса резания в изотерических условиях?
5. В чём особенности развития тепловых процессов при резании различных по свойствам материалов: конструкционной стали, нержавеющей стали, титанового сплава?
6. За счет доминирования каких процессов достигаются высокие значения плотности тепловых потоков при резании конструкционной стали и титанового сплава?
7. Как можно оценить роль теплопроводности обрабатываемого материала в теплоразгрузке контактных поверхностей?
8. Дайте анализ зависимости коэффициента теплопроводности различных материалов от температуры и их влияние на обрабатываемость.
9. На основе каких энергозатрат можно оценить превалирование износа по одной из поверхности инструмента?
10. Обоснуйте схему, позволяющую дифференцированно оценивать влияние скоростного и температурного факторов на стойкость инструмента.
11. Почему эффект от искусственного нагрева в плане повышения стойкости наибольший при резании нержавеющей стали?
12. На каких операциях целесообразно резание с искусственным электроконтактным нагревом с введением дозированных величин тепла и каковы их мощностные характеристики?
13. Как влияют условия резания полимерных композитов на энергетические характеристики процесса?
14. Как влияют энергетические характеристики процесса резания полимерных композитов на выходные параметры качества обработки?
15. Перечислите пути снижения энергозатрат при резании полимерных композитов.

**Список литературы к главе 1**

1. Франафурт У.И. Закон сохранения и превращения энергии. Наука, 1978, 190 с.
2. Якубов Ф.Я. К вопросу определения величины тепловой энергии, концентрирующейся на трущейся поверхности реза. Материалы Всесоюзной научной конференции «Теория трения, износа и смазки». – Ташкент, 1976. – С. 124-128.
3. Мухитдинов Н.Ш. Исследование обрабатываемости нержавеющей стали 12Х18Н10Т и титанового сплава ВТ22 на основе энергетических соотношений: Дис. ... канд. техн. наук. – Ташкент – Томск: ТПИ, 1981. – 126 с.
4. Ишматов М.Х. Повышение стойкости твердосплавных разверток электроконтактным нагревом в процессе приработки. Дисс... канд. техн. наук. – Ташкент – Томск: ТПИ, 1984. – 168 с.
5. Резников А.Н. Теплофизика процесса резания металлов. – М.: Машиностроение, 1981. – 280 с.
6. Розенберг А.М. Трение и износ при резании металлов. – М.: Машгиз, 1955. – С. 32–52.
7. Полухин П.И., Горелик С.С., Воронцов В.К. Физические основы пластической деформации. – М.: Металлургия, 1952. – 584 с.
8. Розенберг А.М., Розенберг О.А. Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания. – Киев: Наук, думка, 1990. – 319 с.
9. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. Изд. 3-е в 2-х частях. – М.: Машиностроение, 1974. – 840 с.
10. Хецберг РВ. Деформация и механика разрушения конструкционных материалов: пер. с англ. – М.: Металлургия, 1989. – 584 с.
11. Даниелян А.М., Бобрик П.И., Гуревич Я.П. и др. Обработка резанием жаропрочных сталей, сплавов и тугоплавких материалов. – М.: Машиностроение, 1965. – 308 с.
12. Панкин А.В. Обработка металлов резанием. – М.: Машгиз, 1961. – 520 с.
13. Титановые сплавы в машиностроении / Под ред. Г.И. Калырина. – Л.: Машиностроение, 1977. – 248 с.
14. Кристиан Д. Теория превращений в металлах и сплавах. Часть 1: Термодинамика и общая кинетическая теория. – М.: Мир, 1978. – 808 с.
15. Ларин М.Н., Мартынов Г.А. Способы нагрева деталей при обработке резанием // Вестник машиностроения. – 1966. – № 8. – С. 70-73.
16. Подураев В.Н. Автоматически регулируемые и комбинированные процессы резания. – М.: Машиностроение, 1977. – 304 с.

17. Лоладзе Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 1982. – 320 с.
18. Лившиц Б.Г., Крапошин В.С., Линецкий Я.Л. Физические свойства металлов и сплавов. – М.: Машиностроение, 1977. – 304 с.
19. Конструкционные материалы. Справочник под общей редакцией Б.Н. Арзамасова. – М.: Машиностроение, 1990 – 688 с.
20. Тарасюк А.П., Кондратюк О.Л., Вerezуб Н.В. Технологии механической обработки полимерных композитов. – Харьков: Точка, 2015 – 228 с.

## **ГЛАВА 2. ПРЕДПОСЫЛКИ СОЗДАНИЯ ИНТЕГРИРОВАННЫХ ПРОЦЕССОВ РЕЗАНИЯ**

Главная задача машиностроения — обеспечить все отрасли народного хозяйства высокоэффективными машинами, оборудованием и рабочими процессами.

Процесс создания машины состоит из двух этапов — проектирования и технологической подготовки производства, включая организацию и изготовление.

Этап проектирования включает в себя конструирование, изготовление опытных образцов, испытание и соответствующую корректировку конструкторской документации. Этап технологической подготовки и организации производства включает в себя разработку технологических процессов изготовления и контроля деталей, сборки машин и их испытание.

В задачи подготовки производства входит также конструирование технологического оборудования, инструмента и оснастки, разработка методов организации и управления производством.

Проблемы конструирования тесно связаны с технологической подготовкой производства. При конструировании важной задачей является обеспечение технологичности конструкции машины, что требует совместной работы конструктора и технолога.

При недостаточно высоком уровне технологии машиностроительного производства необходимо затрачивать больше труда, энергии и средств, а из-за несовершенного технологического оборудования — больше времени и средств на изготовление изделий, что существенно снижает эффективность работы предприятий. Поэтому совершенствование технологических процессов изготовления деталей, сборки и контроля, создание нового прогрессивного технологического оборудования, оснастки, инструмента представляет собой одну из главных народнохозяйственных задач.

Расширение масштабов производства промышленной продукции, развитие и совершенствование конструкций машин, механизмов и приборов на основе новых достижений науки и техники вызывают повышение требований к точности, надежности и долговечности исполнительных механизмов и машин и, как следствие, необходимость создания новых способов обработки и контроля качества деталей и процессов сборки. Трудоемкость технологических процессов существенно возрастает и все более актуальными становятся технологические проблемы производства.

### **2.1. Целевые рабочие процессы изготовления изделий в машиностроении**

Применяемые на предприятиях процессы обработки материалов, начиная от заготовки до получения готового изделия, можно

классифицировать на следующие целевые рабочие процессы: деление-дозирование, соединение, формообразование, изменение физико-механических и химических свойств материалов, размерная обработка, финишная обработка поверхностей, сборка и испытания.

Для достижения заданного качества при выполнении целевых рабочих процессов необходимым условием является проведение контрольных операций, которые следует рассматривать как составную часть выполняемого целевого рабочего процесса.

Классификация рабочих процессов изготовления деталей по целевому назначению предложена Т.Н. Лоладзе [1].

В основе выполнения целевых рабочих процессов обработки деталей лежит использование следующих физико-химических явлений: оплавления, пластической деформации, хрупкого и пластического разрушения, диффузии, адгезии, растворения, фазовых превращений, химических и электро-физико-химических реакций, а также их комбинация и интеграция.

### **2.1.1. Деление-дозирование материала**

Деление-дозирование материала — целевой рабочий процесс, в результате осуществления которого от некоторой массы материала отделяется объем, соответствующий объему требуемой детали с учетом необходимого припуска под дальнейшую обработку.

Дозирование материалов осуществляется путем деления проката на мерные заготовки, взвешиванием порошков, разливкой жидкого материала в емкости определенного объема и др.

Процессы деления, выполняются путем пластического или хрупкого разрушения материалов (рубка с помощью ножей на прессах и гильотинах, деление гладкими вращающимися дисками и т. д.), удалением материала из зоны деления резанием, оплавлением и химическим растворением (резка пилами, ножовочными полотнами, резами, абразивными кругами, газовым пламенем, плазменной струей, анодно-механическим способом и др.).

### **2.1.2. Соединение**

Соединение — целевой рабочий процесс, с помощью которого из отдельных частей образуется готовая деталь или заготовка детали, требующая дальнейшей обработки.

К процессам соединения материалов относятся различные способы сварки (электродуговая, электрошлаковая, трением, газовая, диффузионная, электроннолучевая, лазерная и др.), пайки, склеивания, клепки и др. В технологическом процессе изготовления деталей этот процесс применяется для соединения заготовок, из которых изготавливается деталь. При сборке эти же процессы применяются с целью получения подузлов и узлов. Поэтому соединение следует рассматривать как отдельный рабочий процесс и при изготовлении деталей, и при сборке.

### **2.1.3. Формообразование**

Формообразование — целевой рабочий процесс, при осуществлении которого материал принимает форму заготовки с учетом припуска под дальнейшую обработку или окончательные размеры, если удовлетворяется заданная точность и качество поверхности детали.

Агрегатное состояние материала до и после формообразования может быть различным, поэтому в этих случаях имеет место совмещение процессов формообразования и изменения физико-механических свойств.

Методы формообразования деталей многообразны и осуществляются:

– перераспределением материала в жидком состоянии (литье в земляные формы, кокили, литье по выплавляемым моделям, центробежное литье, электрошлаковый переплав и т. д.);

– перераспределением материала путем пластической деформации (ковка, штамповка, прокатка, гибка, прессование, выдавливание, волочение, накатка, чеканка и др.);

– компактированием порошка (прессование, выдавливание и другие способы порошковой технологии);

– удалением материала резанием (точение, строгание, фрезерование, сверление, протягивание, шлифование и т. д.);

– удалением материала оплавлением, испарением и растворением (электроимпульсная и электроискровая обработка, обработка электронным лучом, плазменной струей, лазером, химическое травление и др.);

– нанесением материала путем наплавки, нанесением порошка с дальнейшим компактированием и др.

Формообразование изделий нанесением материала относится к интегрированным генеративным (аддитивным) технологиям и достаточно полно представлено в [2].

### **2.1.4. Изменение физико-механических и химических свойств**

Изменение физико-механических и химических свойств — целевой рабочий процесс, в результате осуществления которого весь обрабатываемый материал заготовки или только ее поверхностные слои приобретают заданные физические, механические и химические свойства (твердость, прочность, устойчивость к химическим воздействиям и т. д.).

Характерно, что при этом в ряде случаев происходит изменение размеров и формы обрабатываемой заготовки, вызывающее необходимость последующей уточняющей обработки.

К процессам, изменяющим физико-механические и химические свойства материалов, относятся: термообработка (отжиг, нормализация, закалка, отпуск, старение и др.), термомеханическая обработка, при которой происходит совмещение механической обработки с термической обработкой и др.

При выполнении процессов; деления, соединения, формообразования методами давления, литья и прессования порошка, изменения физико-механических и химических свойств материалов возникают технологически «наследственные» погрешности размеров и формы и дефекты поверхностных слоев.

При выполнении процессов соединения возникают неравномерная усадка и внутренние напряжения, вызванные нагревом и оплавлением граничных слоев заготовок деталей. Кроме того, в большинстве случаев невозможно с требуемой точностью осуществить совмещение осей и поверхностей соединяемых элементов заготовок. Все это ограничивает точность размеров заготовок и получение нужного качества поверхности.

Формоизменение материалов методами давления в большинстве случаев проводят в нагретом состоянии с целью понижения сопротивления пластической деформации и повышения податливости материала. Однако при высоких температурах вследствие взаимодействия поверхности заготовок с внешней средой образуются окалина, обезуглероженные слои и другие поверхностные дефекты. Кроме того, при остывании заготовок происходит неравномерное охлаждение и искажение формы. В результате точность, достигаемая при обработке материалов давлением в нагретом состоянии, при остывании снижается и это обстоятельство, со своей стороны, вызывает необходимость увеличения припуска под дальнейшую обработку.

При формообразовании деталей методами литья еще в большей степени проявляются погрешности, вызванные неравномерной усадкой материала в процессе кристаллизации и охлаждения, а на поверхности образуются дефектные слои в виде литейной корки.

При выполнении рабочих процессов изменения физико-механических и химических свойств материалов также возникают искажения формы заготовок вследствие нагрева и охлаждения и возникновения внутренних напряжений.

Технологически «наследственные» погрешности размеров и формы и дефекты поверхностных слоев, возникающие при выполнении процессов деления, соединения, формообразования, изменения физико-механических и химических свойств материалов столь значительны, что для обеспечения заданной точности размеров и качества поверхностных слоев деталей необходимо применять дополнительные уточняющие процессы в виде размерной и финишной обработки поверхностей.

### **2.1.5. Размерная обработка деталей**

Размерная обработка деталей — целевой рабочий процесс, при котором в результате удаления припуска обрабатываемая заготовка получает близкие к заданным или окончательные размеры и форму, с учетом удаления или нанесения материала при финишной обработке поверхности.

После предварительного формообразования припуски на последующую обработку существенны и составляют заметный процент массы готовой детали. Достижение необходимой точности обработки методически осуществляется путем многоазовой обработки с постепенным удалением припуска. При этом с каждым переходом снимаемый припуск уменьшается, в результате чего снижаются силы и деформации системы, величина случайных и систематических погрешностей, возникающих в процессе обработки.

Размерная обработка материалов традиционно осуществляется процессами резания на металлорежущих станках, а также электрофизическими, электрохимическими и химическими методами удаления припуска. При этом высокая точность обработки деталей достигается обеспечением сравнительно малых действующих сил и деформаций системы при незначительной разности температур между обрабатываемой деталью и окружающей средой.

При обработке деталей на токарных, фрезерных, расточных и других станках достигаются 9÷11 квалитеты точности обработки и шероховатость поверхности  $R_a = 10 \div 1$  мкм. Обработка деталей по 8÷5 квалитету точности при шероховатости  $R_a = 1 \div 0,08$  мкм обычно производится на шлифовальных, координатно-расточных и других прецизионных станках, где действующие силы составляют доли ньютона, а деформации системы — микрометры и доли микрометров.

При электрохимических и электрофизических методах размерной обработки действующие силы незначительны, так как удаление припуска происходит путем оплавления или растворения микрообъемов материала. Это позволяет снизить погрешности, однако при этом из-за оплавления материала и последующей кристаллизации образуются дефектные поверхностные слои. Поэтому и эти способы приходится делить на предварительные и чистовые.

К размерной обработке материалов могут быть отнесены также и некоторые специальные методы обработки давлением (ротационная ковка, прецизионная прокатка, ротационное выдавливание, обкатка или накатка, экструзионное выдавливание и др. методы). В вышеуказанных способах размерной обработки давлением обеспечивается локальный контакт инструмента с обрабатываемой заготовкой или малые обжатия материала, а также уравнивание сил аналогично тому, как это происходит в протяжных станках для внутреннего протягивания, что позволяет получать относительно высокую точность обработки.

Поскольку размерная обработка осуществляется поэтапно, то принято делить ее на следующие виды: предварительная, получистовая и чистовая размерная обработка.

К процессам размерной обработки относятся: точение, фрезерование, сверление, протягивание, электроимпульсная и электроискровая обработка, шлифование и др.

Следует подчеркнуть, что трудоемкость размерной обработки в машиностроении и приборостроении чрезвычайно высока и составляет 30÷60% от общей трудоемкости изготовления деталей.

Вопросы размерной обработки деталей резанием достаточно полно представлены в [3].

### **2.1.6. Финишная обработка поверхности деталей**

При размерной обработке деталей способами резания, наряду с достижением точности, обычно удаляются дефектные поверхностные слои, возникшие на предыдущих операциях, снижается шероховатость и повышается качество поверхности, т. е. процессы размерной обработки во многих случаях совмещают в себе и процессы отделки поверхности.

Однако, если требуется получить шероховатость  $R_a = 0,02 \div 0,01$  мкм, то в этом случае оказывается необходимым применять такие способы обработки поверхности, как доводка, тонкое шлифование, хонингование, суперфиниширование, полирование, притирка и др. Наряду с этим имеются случаи, когда заданная точность невысока, но необходимо получить высокий класс шероховатости поверхности, либо придать ей особые свойства (износоустойчивость, кислотоупорность, антикоррозионность и др.). В этих случаях, наряду с вышеуказанными способами, применяются процессы упрочнения деталей поверхностно-пластическим деформированием, нанесение покрытий и др., при которых происходит изменение качества поверхности, придаются ей необходимые свойства, а размеры в большинстве случаев остаются в пределах поля допуска.

Финишная обработка поверхности — целевой рабочий процесс, в результате выполнения которого достигается необходимое качество поверхности деталей. Отличительной чертой этого рабочего процесса является незначительное изменение геометрических размеров детали в пределах поля допуска. Финишная обработка поверхности обычно является завершающей операцией технологического процесса изготовления деталей.

К финишным операциям относятся: тонкое точение и растачивание, алмазное выглаживание, тонкое шлифование, суперфиниширование, хонингование и др.

Очевидно, что достижение высокой точности и качества поверхности и впредь будет являться важной проблемой развития технологии машиностроительного производства.

В настоящее время активно развиваются процессы микро- и нанорезания [3]. Обработка с точностью 0,01 мкм (10 нм) ÷ 0,001 мкм (1 нм) считается ультрапрецизионной. Традиционная обработка (точение, фрезерование) может достигать точности в диапазоне 10÷100 мкм, а нанообработка — выше диапазона точности ультрапрецизионной обработки до атомарной.

В общем случае нанообработку можно классифицировать по четырем группам.

- Обработка лезвийным и абразивно-алмазным инструментом. Она реализуется с применением закрепленных режущих элементов, которые обеспечивают точную форму обрабатываемых поверхностей. Съем материала минимизирован до десятков нанометров. Сюда относятся алмазное точение, микрофрезерование, нано- и микрошлифование, хонингование, суперфиниширование и др.

- Нанообработка свободным абразивом. При реализации используются свободные абразивные микро- и нанозерна. Единичные, не связанные зерна (в составе паст или суспензий) снимают малые объемы обрабатываемого материала. Сюда относятся доводка, полирование и др., при этом существенную роль играют химические процессы воздействия на обрабатываемый материал.

- Немеханическая нанообработка. К этой группе относятся способы электроионные, микроэлектроэрозийные, лазерные и др.

- Литографические способы. Реализуются с использованием масок для точного направленного воздействия на поверхность детали.

Из этих способов обработки наибольшие преимущества имеет механическая обработка, которая гарантированно обеспечивает точность изготовления трехмерных объектов до нанометрических характеристик точности и качества поверхности.

Исследования в этой области будут понуждать развитие и интегрировать целый спектр наук в силу междисциплинарной природы нанотехнологий.

### **2.1.7. Сборка**

Сборка машин — целевой рабочий процесс, заключающийся в соединении готовых деталей, сборочных единиц и агрегатов в определенной последовательности, в результате чего получают готовую машину или механизм, отвечающие установленным требованиям.

Процесс сборки является завершающим этапом, от которого в значительной мере зависит качество выпускаемой продукции.

В настоящее время в единичном и серийном производстве трудоемкость сборочных работ в среднем составляет 40÷60% от всей трудоемкости изготовления изделия, а в массовом производстве — около 20%. На машиностроительных заводах основная часть сборочных операций выполняется вручную. Поэтому сборочное производство обладает крупными потенциальными резервами для снижения материальных и трудовых затрат и повышения качества и надежности. Рабочий процесс сборки по характеру и технологической сущности выполняемых работ связан с относительными перемещениями и ориентацией соединяемых деталей и сборочных единиц. Деталь является составляющим звеном в кинематической цепи машины. Все размеры в машине, сборочные единицы и детали находятся в определенной взаимосвязи друг с другом, изменение одного из размеров может существенно влиять на другие, а также на работоспособность машины в целом.

### **2.1.8. Испытание машин**

Испытание машин следует рассматривать как целевой рабочий процесс, заключающийся в экспериментальном определении конструктивных и эксплуатационных свойств подузлов, узлов и машины в целом для выявления их соответствия техническим требованиям. Основное назначение испытаний — обеспечение заданного качества продукции.

Испытание машин проводится на предприятиях, а также в процессе их эксплуатации. В заводских условиях испытания машин проводится при создании новых конструкций, а также при их производстве, при этом испытываются отдельные подузлы, узлы, агрегаты, системы управления и др. раздельно или же изделия в целом.

Испытания являются составной частью производственного процесса изготовления машин. Например, на станкостроительных заводах испытание металлорежущих станков включает в себя проверку точности движения рабочих органов, легкости управления (эргономики), плавности хода, исследование усилий в механизмах подачи, реверса и др., измерение мощности на шпинделе станка, определение производительности.

Целевой рабочий процесс испытания машин в зависимости от вида изделий имеет различную трудоемкость, которая может изменяться от единиц до десятков процентов общей трудоемкости изготовления изделия.

## **2.2. Тенденции, принципы и критерии создания интегрированных процессов обработки материалов резанием**

### **2.2.1. Тенденции развития методов обработки материалов резанием**

К настоящему времени в мировой практике металлообработки разработано большое количество методов обработки деталей.

По своей сущности методы обработки усложнились. Интенсивность протекания процессов разрушения, деформирования, преобразования материала деталей значительно возросла. В разработке и совершенствовании методов обработки имеет место тенденция одновременного воздействия на обрабатываемые заготовки и детали механических нагрузок и химических веществ, теплового или магнитного полей, электрической и лучевой энергии, энергии элементарных частиц и т. д. в различном их сочетании.

Все большее внимание уделяется развитию и совершенствованию методов обработки со съемом относительно небольших слоев металла и создание на поверхности и в поверхностном слое необходимых физико-механических свойств и шероховатости. Это объясняется непрерывным совершенствованием методов получения заготовок, уменьшением припусков на механическую обработку, ростом требований к точности и необходимостью повышения качества и эксплуатационных свойств деталей и изделий, применением в машиностроении новых конструкционных материалов.

Отмечается стремление к существенному повышению скорости резания и микрорезания (скоростная, сверхскоростная обработка); дальнейшее развитие нетрадиционных методов обработки. Определенное влияние на совершенствование методов обработки оказывает развитие интегрированных технологий.

Многообразие разработанных и применяемых в технологии машиностроения методов обработки, необходимость решения вопросов автоматизации технологического проектирования ставят задачу систематизации имеющихся в этой области сведений. Известно, что одни и те же детали могут быть обработаны по различным технологическим схемам, при многовариантном сочетании методов обработки.

В связи с этим представляет интерес систематизация и схематизация существующих методов обработки, выявление общих характерных признаков и классификация их на этой основе в соответствующие группы и классы. Такое построение значительно упрощает изучение и использование методов обработки, полнее выявляет их взаимосвязь и возможности совершенствования и развития. Классификация методов обработки создает предпосылки для их формализации и алгоритмизации, что является важным условием автоматизации технологического проектирования. Кроме того, разработав основные принципы построения и развития методов обработки, можно перейти от описательного метода изложения и изучения методов обработки к изучению методологии, основ их разработки.

### **2.2.2. Принципы и методы создания интегрированных процессов обработки материалов резанием**

Под методом обработки понимают комплекс условий, характеризующих взаимодействие обрабатывающей среды или инструмента и обрабатываемой заготовки (детали), используемых для одной или совокупности технологических задач: изменения формы, размеров и взаимного расположения элементов детали, состояния и свойств ее материала, поверхности и поверхностного слоя [4]. Метод обработки определяется видом используемой энергии (механической, химической, электрической, тепловой и др.), производительностью, сущностью процесса формообразования (например, со съемом материала или пластическим деформированием), типом применяемого инструмента или обрабатывающей среды и их характеристиками, кинематикой процесса и его схемой. Изменение одного из перечисленных факторов вызывает изменение в названии и содержании метода обработки.

Создание интегрированных методов обработки основывается на одновременном или последовательном использовании различных видов энергии и вызываемых ими соответствующих физических эффектов [5], способов подвода в зону обработки, совмещения воздействия различных инструментов, комбинирования кинематических схем [6].

Рациональное использование интегрированных методов обработки приводит к повышению, как производительности обработки, так и качества детали. Кроме того, в ряде случаев освоение интегрированных методов обработки позволяет достигнуть новых технических результатов, например, значительно увеличить прочность, износостойкость и другие эксплуатационные характеристики деталей, а также достичь синергетического эффекта, проявляющегося в превышении результирующих показателей над аддитивной суммой отдельных составляющих.

**• Принципы создания интегрированных процессов обработки материалов резанием:**

- принцип усложнения кинематики для повышения выходных показателей процесса;
- принцип совмещения различных процессов в пространстве и во времени;
- принцип рационального комбинирования различных процессов;
- принцип введения дополнительной энергии в базовые процессы механической обработки;
- принцип восстановления режущих свойств инструмента в процессе работы;
- принцип желательности достижения синергетического эффекта, проявляющегося в превышении результирующих показателей над аддитивной суммой отдельных составляющих.

Главный критерий при разработке или выборе интегрированного процесса обработки — повышение эффективности по всем основным показателям или отдельным — лимитирующим (производительность, качество, себестоимость, эксплуатационные характеристики, конкурентоспособность).

**• Методы создания интегрированных процессов обработки материалов резанием** (примеры соответствуют интегрированным процессам, рассмотренным в книге):

- использование дополнительного теплового воздействия (например, резание с искусственным нагревом);
- использование дополнительного механического воздействия (например, резание с опережающим пластическим деформированием);
- конструктивное совмещение в одном инструменте элементов различного функционального назначения (например, совмещение в одном инструменте режущих и деформирующих элементов);
- усложнение кинематики для повышения выходных показателей процесса (например, резание с интегрированной кинематикой);
- совмещение по времени различных процессов с унаследованием новых свойств инструмента (например, резание с предварительной приработкой

режущего инструмента; резание инструментом с износостойкими покрытиями);

– использование дополнительного вибрационного воздействия (например, алмазное шлифование с вибрациями; виброабразивная обработка);

– введение дополнительной электрической энергии в зону шлифования (например, алмазно-искровое шлифование; силовое электроалмазное шлифование);

– использование нетрадиционных видов энергии для формирования абразивных инструментов и управления процессом обработки (магнитно-абразивная обработка; резание материалов сверхзвуковыми струями жидкости с примесями абразивов);

– управления режущей способностью абразивных инструментов в процессе шлифования (пример, алмазное шлифование с управлением рабочей поверхностью кругов).

### **2.3. Классификация интегрированных процессов обработки материалов резанием**

#### **2.3.1. Принципы систематики**

Отличительные признаки различных интегрированных технологий механической обработки основываются, в первую очередь, на физико-химических и технологических особенностях процессов снятия припуска и формирования обработанной поверхности деталей.

В настоящее время по принципу интеграции механической обработки с дополнительным физико-химическим воздействием на процесс удаления припуска создано и достаточно успешно реализовано большое количество технологий. Их перечень гораздо шире, чем число относимых непосредственно к обработке материалов резанием. Имеется практическая необходимость в использовании комбинированных (комплексных) способов эффективной обработки материалов резанием и пластическим деформированием непосредственно на металлообрабатывающих станках.

Поэтому представляется целесообразным и необходимым разработать классификацию интегрированных процессов обработки материалов резанием на более широкой основе, тем более, что существующая ограниченная классификация, в настоящее время характеризует лишь занятую технологическую нишу в различных отраслях производства, не является исчерпывающей, а разнообразие способов обработки требует осознанного выбора той или иной технологии.

Представленная классификации интегрированных процессов резания материалов основана на терминологии, общепринятой в теории и технологии размерного формообразования. Предлагаемая классификация позволит приблизить понятие «интегрированные процессы резания» к разряду существующих технологических процессов изготовления, используя для

этого подходы и критерии, принятые в машиностроении. Добавление признаков, определяемых спецификой рассматриваемых процессов, даст возможность более полно оценить технологические возможности интегрированных технологий и отдельных способов их реализации.

На основе проведенного анализа интегрированных процессов механической обработки, прежде всего процессов обработки материалов резанием, выделены комплексы признаков — энергетических, технологических, инструментальных и формообразующих. В рамках этих комплексов классификационные признаки разбиты на 18 групп, каждая из которых содержит от 3 до 12 признаков. Часть их заимствована [2, 7] с добавлением или изменением отдельных показателей признаков.

### **2.3.2. Комплекс энергетических признаков**

В первую очередь обращено внимание на энергетический аспект процессов. В энергетический комплекс признаков включено 5 групп:

- вид энергии, непосредственно подводимой к объекту;
- энергия, определяющая образование формы;
- распределение энергии во времени;
- подвод энергии и распределение ее в пространстве, занимаемом объектом;
- энергоемкость процесса формообразования.

#### **2.3.2.1 Вид энергии, непосредственно подводимой к объекту.**

Группа 1 характеризует вид энергии, непосредственно подводимой к объекту или на границе объекта и окружающей среды:

- 1.1 – механическая (энергия механического движения и взаимодействия тел или их частей);
- 1.2 – тепловая (энергия, связанная с движением атомов, молекул или других частиц, из которых состоит какое-либо вещество);
- 1.3 – электрическая (энергия электромагнитного поля, слагающаяся из энергии электрического поля и энергии магнитного поля);
- 1.4 – магнитная (энергия магнитного поля);
- 1.5 – электростатическая (потенциальная энергия взаимодействия электрических зарядов);
- 1.6 – химическая (энергия системы из двух или более реагирующих между собой веществ);
- 1.7 – лучевая (лазерная — энергия лазерного луча; светолучевая — энергия светового луча видимого света);
- 1.8 – ядерная.

Объектом могут являться: обрабатываемая деталь (заготовка); инструмент; зона непосредственного контакта инструмента с деталью.

Во всех случаях применительно к интегрированным процессам резания обязательным условием является наличие подвода исходной механической

энергии. Дополнительный подвод различных видов энергии может существенно повышать выходные показатели процесса.

Примеры использования дополнительных видов энергии.

**Механическая энергия.**

*Резание с опережающим пластическим деформированием* [8]. Резание с опережающим пластическим деформированием (ОПД) обеспечивает улучшение условий стружкообразования путем рационального изменения физико-механических свойств материала срезаемого слоя вследствие его упрочнения до процесса срезания. Упрочнение осуществляют накатным устройством, создающим глубину и степень наклепа, необходимые для получения максимальной эффективности последующего процесса резания. Энергия подводится к заготовке.

*Ультразвуковое резание* [8]. Ультразвуковыми методами обработки называют способы, использующие ультразвуковые колебания; они могут применяться в качестве основного воздействия для снятия, материала (например, размерная ультразвуковая обработка) или в сочетании с другими видами воздействия (механическими, электрическими, химическими) как средство интенсификации какого-то другого метода обработки (например, механические, электрохимические или другие виды обработки с наложением на инструмент вибраций ультразвуковой частоты). Ультразвуковые колебания наиболее широко применяют для размерной обработки твердых и сверхтвердых материалов по любому сложному профилю, для очистки, пайки, дефектоскопии и других технологических процессов, а также для улучшения процессов обработки резанием. Ультразвуковыми называют упругие механические колебания с частотой, равной или выше  $16 \div 18$  кГц. При ультразвуковом резании энергия подводится к инструменту.

*Абразивная обработка шлифованием и хонингованием с наложением вибраций* [8]. Подвод механической энергии в виде колебаний к обрабатываемой детали, инструменту или СОТС улучшает эти операции. Это объясняется повышением равномерности загрузки отдельных абразивных зерен, лучшим доступом СОТС и удалением продуктов обработки.

Повышение интенсивности съема металла при абразивной обработке с вибрациями объясняется постоянной сменой рабочих граней, скоростей и углов резания, большим динамическим взаимодействием зерен и обрабатываемого материала, а также увеличением плотности сетки следов абразивных зерен на обрабатываемой поверхности. Все это ведет к снижению действующих сил и температур, а, следовательно, повышению производительности обработки и качества поверхности; при этом ликвидируются самоотпуск материала поверхности детали, микротрещины, интенсивный наклеп.

**Тепловая энергия.** *Резание с нагревом заготовки* [8]. Одним из средств улучшения обрабатываемости резанием является искусственный подогрев

материала срезаемого слоя заготовки до определенной температуры. Этот метод обработки эффективен, прежде всего, для обработки сталей и сплавов высокой прочности, тугоплавких материалов, а также нержавеющей и жаропрочных материалов.

### **Электрическая энергия.**

*Введение электрического тока в зону резания при лезвийной обработке* [8]. Подвод электрической энергии в зону резания является эффективным средством улучшения обрабатываемости высокопрочных и твердых сталей. При обработке этих материалов на контактных поверхностях наблюдаются условия, близкие к сухому трению; при этом взаимодействие трущихся пар происходит по химически чистым поверхностям. В этом случае физическое состояние контактной пары инструмент — заготовка можно искусственно изменить путем ввода в зону резания электрического тока низкого напряжения. Электрический ток, распределяясь в зоне контакта инструмента и заготовки пропорционально контактным электрическим напряжениям, выделяет дополнительное количество тепла. Вследствие образования тонкой пластичной пленки создается полусухое трение, снижается коэффициент трения, повышается площадь истинного контакта трущейся пары. Пропускание электрического тока приводит к интенсификации процессов образования окисных пленок на поверхностях трения; кроме того, как разрыв электрической цепи, так и введение электрического тока оптимального направления и величины снижает интенсивность отрицательного воздействия тока, обусловленного процессом резания.

*Формообразование рабочей поверхности абразивных инструментов на токопроводящих связках в процессе работы* [3].

Возможны три схемы регулирования интенсивности принудительного удаления токопроводной связки круга в процессе шлифования.

**Совмещенная схема.** Этой схеме соответствуют метод электроабразивного шлифования. Его суть заключается в том, что между токопроводящим кругом и токопроводящей обрабатываемой заготовкой пропускается регулируемый электрический ток. Тогда к основному процессу абразивного резания добавляется электрическая энергия, направленная на повышение эффективности процесса. В зависимости от материала зерен (абразив, алмаз, кубонит), вида электрического тока (постоянный, переменный или импульсный), полярности (прямая – круг – катод, обратная – анод) и подаваемой в зону резания жидкости (электролит, диэлектрик) сформировались названия вариантов электроабразивного шлифования. Например, электролитическое, электрохимическое, электроалмазное, алмазно-искровое и др. Все эти способы в той или иной мере позволяют регулировать воздействие на связку круга. Ограничением их технологических возможностей является обработка только токопроводных заготовок.

**Автономная схема.** Этой схеме соответствует воздействие на связку круга вне зоны резания, что позволяет ее использовать при шлифовании нетокопроводных сверхтвердых поликристаллов и др. диэлектриков. В качестве метода формообразования связки целесообразно использовать электрохимический. Он позволяет выполнять формообразование на станке в процессе шлифования при отсутствии износа электрода инструмента.

**Комбинированная схема** объединяет совмещенную и автономную схемы.

**Магнитная энергия.** *Магнитно-абразивная обработка.* Обработка деталей в магнитном поле ферромагнитными порошками является примером интегрированного метода обработки, в котором сочетается механическое воздействие с использованием энергии магнитного поля. По своему воздействию на обрабатываемую поверхность метод магнитно-абразивной обработки можно отнести к финишным — полирование с элементами упрочнения поверхностного слоя.

**Электростатическая энергия.** *Ионно-плазменные процессы нанесения износостойких покрытий на режущий инструмент* [2]. Изменением величины электростатического поля управляют энергией ионов, что позволяет осуществлять десорбцию, миграцию поверхностных атомов и химические реакции, распыленность и имплантацию, делать очистку, синтезировать покрытие или модифицировать свойства поверхностного слоя изделия.

**Химическая энергия.** *Применение СОТС с химически активными компонентами.* Технологическая эффективность СОТС определяется комплексом его функциональных действий (эффектов) непосредственно в процессе механической обработки — смазочного, диспергирующего, охлаждающего, моющего. Смазочное действие СОТС заключается в его экранирующем и антифрикционном эффектах вследствие образования на контактирующих поверхностях режущего инструмента и обрабатываемой заготовки вторичных структур. Диспергирующее действие СОТС проявляется как на обрабатываемой заготовке, так и в зоне контакта между заготовкой и инструментом, и определяется его высокой поверхностной активностью — способностью непосредственно в зоне разрушения эффективно снижать поверхностную энергию (работу образования новой поверхности) обрабатываемого твердого тела (заготовки). Моющее действие СОТС проявляется в физико-химических, механических и гидродинамических процессах (отделение дисперсных продуктов от поверхностей заготовки и инструмента, стабилизация продуктов диспергирования и предотвращение их последующей десорбции заготовкой, инструментом или элементами системы применения СОТС). С помощью охлаждающего действия СОТС, определяемого его теплофизическими свойствами и гидродинамическими условиями в зоне обработки, обеспечивается дополнительный отвод тепла из

зоны обработки и, как следствие, — снижение контактных температур и особенно температур режущего инструмента и заготовки [9].

**Лучевая (лазерная — энергия лазерного луча; светолучевая — энергия светового луча видимого света).**

*Резание лезвийным инструментом с локальным нагревом заготовки перед зоной резания лучом лазера.*

*Формообразование рабочей поверхности абразивного инструмента (правка) лучом лазера.*

**Ядерная энергия.** Ядерное воздействие на современном уровне исследований практически не изучено, хотя имеются сведения о положительном влиянии облучения на интенсивность резания труднообрабатываемых материалов, повышение предела усталостной прочности деталей, работающих при знакопеременных нагрузках [10]. Есть основания считать, что под действием излучения происходят физические процессы на уровне атомов и молекул вещества, изменяющие внутреннюю энергию и напряжения, что может быть использовано для технологических целей в интегрированных процессах обработки. Ожидаемой областью их применения могут быть финишные операции ультрапрецизионной точности на базе интегрированных процессов нанорезания. Однако в настоящее время примеры применения ядерной энергии при размерной обработке материалов отсутствуют. Кроме этого, при облучении необходимо учитывать возможное воздействие этого явления на окружающую среду, и требуются особые меры защиты персонала и создание дорогостоящих изолированных участков, требующих существенных затрат.

### ***2.3.2.2 Энергия, определяющая сьем материала и физический механизм формообразования***

Группа 2 характеризует энергию, определяющую сьем материала и физический механизм формообразования:

- 2.1 – механическая (базовый вид энергии при механической обработке);
- 2.2 – тепловая (энергия, выделяющаяся при деформации обрабатываемого материала и работе сил трения);
- 2.3 – химическая (химические процессы между обрабатываемой поверхностью детали и инструментом и/или средой обработки);
- 2.4 – энергия фазовых переходов;
- 2.5 – ядерная энергия.

Примеры известных проявлений различных видов энергии [5] применительно к процессам образования формы при интегрированном формообразовании (вид энергии — форма движения материи — вид проявления).

**Механическая энергия при формообразовании:**

- движение твердых тел (перемещение, вращение, колебание);

– направленное движение тел и частиц (движение режуще-деформирующего инструмента, абразивных частиц; движение жидкости, газа, молекул, атомов, элементарных частиц);

– турбулентное движение частиц (движение в жидкостях, газах, плазме);

– волновые возмущения (акустические и поверхностные волны);

– упругая деформация тел (изгиб, растяжение, кручение твердых тел; сжатие твердых тел, жидкостей, газов, плазмы);

– пластическая деформация;

– хрупкое разрушение;

– межмолекулярное и межатомное взаимодействие (межмолекулярные и межатомные силы поверхностного натяжения и капиллярности на границе раздела сред, молекулярные силы сорбции).

**Сорбция** (от лат. *sorbeo* — поглощаю), поглощение твердым телом или жидкостью вещества из окружающей среды. Поглощающее тело называется сорбентом, поглощаемое им вещество — сорбатом (или сорбтивом). Различают поглощение вещества всей массой жидкого сорбента (абсорбция); поверхностным слоем твердого или жидкого сорбента (адсорбция). Поглощение вещества из газовой среды всей массой твердого тела или расплава называется также окклюзией. Сорбция, сопровождающаяся химическим взаимодействием сорбента с поглощаемым веществом, называется хемосорбцией [11].

#### **Тепловая энергия при формообразовании:**

– хаотическое тепловое движение молекул и атомов (перемещение, вращение, колебание);

– тепловое движение частиц при смещении тел (смещение твердых тел, жидкостей, газов; твердых тел и жидкостей, жидкостей и газов, твердых тел и газов; смещение твердых тел, жидкостей и газов)

– тепловое движение электронов (возбуждение электронных орбит в твердых телах, жидкостях и газах);

– тепловое движение зарядов (смещение зарядов плазмы, электронно-позитронного газа, мезонного и электронно-мезонного газа).

#### **Химическая энергия при формообразовании:**

– химические реакции соединения (окисление, рекомбинация, нейтрализация, полимеризация, гидратация, образование гиперфрагментов, ионизация с присоединением электрона или иона);

– химические реакции разложения (разложение молекул и полимеров, диссоциация, ионизация в процессе разложения, дегидратация);

– химические реакции замещения (замещение в электролитах, кристаллах и на границе раздела сред);

– химические реакции перехода веществ из возбужденного состояния в основное (переход твердых тел, жидкостей и газов).

**Энергия фазовых переходов:**

- фазовые переходы первого рода (изменение агрегатного состояния и кристаллической структуры, растворение и выпаривание кристаллов);
- фазовые переходы второго рода (переход в сверхпроводящее состояние и обратно, переход ферромагнетиков в парамагнетики и обратно, переход гелия-I в гелий-II и обратно, поляризация и деполяризация диэлектриков);

**Ядерная энергия:**

- синтез ядер (спонтанный, управляемый, импульсный, комбинированный);
- деление ядер (спонтанное, управляемое, импульсное, комбинированное);
- радиоактивные превращения (при захвате ядром электрона с К-оболочкой, при изомерных переходах, при испускании  $\gamma$ -квантов, радиоактивный распад);
- аннигиляция (лептонов, бозонов, гиперфрагментов, атомов, молекул, макросистем).

**2.3.2.3 Энергия, определяющая образование формы.**

Группа 3 определяет характер поступления энергии к объекту:

- 3.1 – непрерывный, в течение всего процесса (нагрев-охлаждение);
- 3.2 – пульсирующий, регулярно изменяющий свою величину при неизменности направления действия;
- 3.3 – импульсный (воздействие, признак или параметр которого представляет собой импульс или последовательность импульсов, т. е. имеют место временные интервалы отсутствия подачи энергии).

Применительно к обработке резанием: пульсирующий подвод механической энергии соответствует случаям периодического изменения глубины резания (неравномерность припуска) и др.; импульсный — при обработке прерывистых поверхностей или со специальным импульсным нагружением инструмента, например, ударное сверление хрупких материалов.

Применительно к интегрированным методам обработки с подачей дополнительной электрической энергии признаки данной группы соответствуют характеристикам электрического тока, подаваемого в зону формообразования; использующим луч лазера — характеристикам лазерного излучения.

**2.3.2.4 Подвод энергии и распределение ее в пространстве, занимаемом объектом.**

Группа 4 определяет характер подвода и распределения энергии:

- 4.1 – точечный (воздействие отдельных абразивных частиц);
- 4.2 – линейный (криволинейный — воздействие режущего лезвия инструмента; обработка сканированием поверхности лазером непрерывного действия);

4.3 – поверхностный (опережающий нагрев обрабатываемого материала, деформационное выглаживание поверхности детали; электрохимическое формообразование рабочей поверхности шлифовальных кругов в процессе работы);

4.4 – объемный (термическая обработка);

4.5 – точечно-линейный (воздействие отдельных закрепленных абразивных частиц, где линия — траектория их движения; сканирование поверхности импульсным лазером);

4.6 – точечно-поверхностный (интегрированное воздействие отдельных абразивных частиц на обрабатываемую поверхность и др.);

4.7 – точечно-объемный (интегрированное тепловое воздействие отдельных абразивных частиц на поверхностный слой обрабатываемой детали).

Признаки этой группы учитывают интеграцию в одном процессе нескольких видов подвода энергии. Так, например, обработка свободными абразивными частицами, электроэрозионные и ультразвуковые методы, характеризуются точечным (в физическом смысле) подводом энергии, но вследствие того, что частоты точечных воздействий велики, интегральная картина явления определяется уже результатом статистики массового воздействия на обрабатываемую поверхность. Этим методам обработки соответствует точечно-поверхностный подвод энергии.

#### ***2.3.2.5 Энергоемкость процесса формообразования.***

Группа 5 характеризует удельную энергоемкость процесса, соответствующую трем энергетическим уровням, связанным с фазовыми переходами первого рода (изменение агрегатного состояния):

5.1 – низкая (до энергии плавления);

5.2 – средняя (энергия плавления — энергия испарения);

5.3 – высокая (выше энергии испарения).

Первый энергетический уровень включает методы, при которых нарушаются силы связи только между относительно небольшой частью молекул и атомов. Поэтому при первом энергетическом уровне (верхней границей является энергия плавления материала объекта обработки) для преодоления сил связи требуются сравнительно малые энергии. Типичными представителями этой группы будут методы пластического деформирования и обработки резанием (строгание, точение, сверление, фрезерование, протягивание, микрорезание, шлифование, суперфиниширование, доводка) [6]. Второй энергетический уровень включает виды обработки с диапазоном энергий от величины плавления до величины испарения. Типичными представителями второй группы будут методы электрофизической обработки (электроконтактная, электроимпульсная, электроэрозионная, электроискровая). Третий энергетический уровень превышает энергию испарения обрабатываемого материала. Сюда относятся электрохимический и лучевой (лазерный или светолучевой) методы обработки.

### **2.3.2.6. Комплекс технологических признаков**

Группа 6 характеризует среду обработки. В первую очередь обращено внимание на технологический особенности процессов. В технологический комплекс признаков включено 2 группы:

- вид среды обработки;
- давление среды обработки.

#### **• Вид среды обработки.**

Под средой обработки (рабочей средой) будем понимать вещество, заполняющее пространство, непосредственно примыкающее к обрабатываемой детали и инструменту. Для контактных методов обработки (резание и пластическое деформирование) среду обработки принято называть смазочно-охлаждающей технологической средой (СОТС) или смазочно-охлаждающей жидкостью (СОЖ). В ряде случаев для интегрированных процессов обработки среда обработки может выполнять функции инструмента. Например, гидроструйное и гидроабразивное резание и др.

Для бесконтактных методов обработки, работающих с гарантированным зазором между инструментом и деталью — рабочей средой. К бесконтактным методам обработки относятся отдельные методы физико-химической обработки (например, электрохимическая и электроэрозионная).

Среда обработки может быть газообразной, жидкой и твердой (по агрегатному состоянию вещества) или представлять собой дисперсную систему. Дисперсные системы, состоят из множества частиц какого-либо тела (дисперсная фаза), распределенных в однородной среде (дисперсионной среде). Характеризуются сильно развитой поверхностью раздела между фазами. Примеры: эмульсия (частицы масла в жидкости); суспензия (твердые частицы в жидкости); туман (частицы жидкости в газе); дым, пыль (твердые частицы в газе).

#### **• Среда обработки может быть следующих видов:**

- 6.1 – воздух;
- 6.2 – инертные газы;
- 6.3 – химически активные газы;
- 6.4 – вакуум;
- 6.5 – вода техническая;
- 6.6 – электролиты;
- 6.7 – диэлектрические жидкости (масла, керосин);
- 6.8 – расплавы легкоплавких металлов;
- 6.9 – эмульсии;
- 6.10 – суспензии;
- 6.11 – пылевидные частицы;
- 6.12 – твердые смазки (дисульфид молибдена и др.).

#### **• Давление среды обработки.**

Группа 7 определяет относительный уровень давления среды обработки:

7.1 – пониженное (нанесение износостойких вакуумно-плазменных покрытий на режущий инструмент);

7.2 – нормальное (атмосферное);

7.3 – повышенное (подача СОЖ при обработке резанием);

7.4 – высокое (прокачка электролита в межэлектродном зазоре при размерной электрохимической обработке);

7.5 – особо высокое (гидроструйное и гидроабразивное резание).

### **2.3.3. Комплекс инструментальных признаков**

Комплекс инструментальных признаков в первую очередь ориентирован на базовые процессы механической обработки с учетом возможности их интегрирования с электро-физико-химическими воздействиями.

Понятие «инструмент» в интегрированных технологиях не всегда идентичен такому же понятию в традиционных технологиях, например, роль «инструмента» может выполнять луч лазера, струя жидкости и др.

В комплекс инструментальных признаков включено 7 групп:

– конструктивные элементы инструмента;

– конструктивные признаки инструмента;

– соотношение процессов резания и пластического деформирования;

– виды рабочих движений инструмента;

– характер рабочих движений инструмента;

– скорость рабочих движений инструмента;

– жесткость рабочей части инструмента.

Уровень и производительность процессов механической обработки в большой мере определяются используемым инструментом.

Инструмент — орудие человеческого труда или исполнительный механизм машины. По принципу использования различают следующие виды инструмента: 1 – ручной, 2 – станочный (машинный), 3 – механизированный (ручные машины), 4 – измерительный (контрольно-измерительный), 5 – вспомогательный. Далее будем рассматривать только станочный (машинный) инструмент.

Инструмент станочный (машинный) — исполнительный элемент станка (машины) непосредственно взаимодействующий с обрабатываемым объектом (заготовкой, деталью).

Инструмент станочный (машинный) является съемным (сменным) элементом (т. е. заменяемым элементом) для его замены в случае износа или необходимости изменения его разновидности в связи с особенностями задач обработки. Износ инструмента может быть нормальным (достижение заданного критерия износа) или катастрофическим (поломка или разрушение инструмента).

#### **2.3.3.1 Конструктивные элементы инструмента.**

Группа 8 характеризует тип конструктивных элементов:

- 8.1 – режущие или деформирующие элементы;
- 8.2 – присоединительные элементы (с базовыми поверхностями);
- 8.3 – вспомогательные элементы;
- 8.4 –объединяющий элемент.

Рассмотрим более подробно элементы инструмента [12] с учетом того, что при соответствующем конструктивном выполнении режущее лезвие функционально трансформируется в деформирующий элемент. В общем случае режущие или деформирующие элементы можно рассматривать как рабочие элементы, т. е. непосредственно участвующие в процессе обработки.

*Режущие элементы* (элементарные резцы) содержат режущие лезвия и предназначены для осуществления процесса резания. Это зубья, пластины из инструментальных материалов (в том числе сменные многогранные), ножи, вставки, элементарные резцы и т. п. Заметим, что в отличие от других элементарных резцов зубья конструктивно не оформлены и не имеют собственных присоединительных элементов. Зубья характерны для цельных инструментов, в то время как конструктивно оформленные элементарные резцы характерны для сборных инструментов с разъемным соединением,

*Присоединительные элементы* с установочными базовыми поверхностями предназначены для установки, базирования, присоединения и крепления режущего инструмента к станку или приспособлению, а также для передачи сил, моментов и движений. Это державки, оправки, «ласточкины хвосты», цилиндрические и конические хвостовики, базовые отверстия и торцы, шпоночные пазы и т. п.

*Вспомогательные элементы* служат для размещения, отвода, разделения стружки; размещения и крепления режущих элементов; направления инструмента во время работы; его наладки и регулировки; подвода СОТС и др. Вспомогательные элементы могут быть отдельными деталями или частью цельной конструкции. К ним относятся: стружечные канавки и уступы; накладные стружколомы; стружкоразделительные канавки; пазы; прихваты; штифты; винты; клинья; компенсаторы; направляющие и т. п.

*Объединяющий элемент* предназначен для размещения режущих и других элементов с объединением их в единое целое. Как правило, у сборных инструментов объединяющим элементом является корпус, а у цельных — та или иная условно выделяемая промежуточная часть между элементами.

В состав перечисленных конструктивных элементов входят ограничивающие их поверхности и линии (геометрические элементы), например, передняя и задняя поверхности, режущая кромка, базовые поверхности.

Кроме того, принято выделять также составные части инструмента, каждая из которых является совокупностью тех или иных элементов.

*Режущая часть* содержит элементарная резцы, не участвующие в процессе формообразования. Она служит только для срезания припуска, ее

кромки не соприкасаются с заданной чертежом поверхностью детали. Режущую часть иногда называют заборной (от понятия «забирать» обрабатываемый материал).

*Калибрующая часть* содержит элементарные резцы, участвующие в процессе формообразования и формирующие поверхность обрабатываемой детали с заданными размерами и свойствами.

Совокупность режущей и калибрующей частей называют *рабочей частью* режущего инструмента. Наличие всех указанных элементов и составных частей не всегда обязательно. Например, иногда отсутствуют вспомогательные элементы, калибрующая часть совпадает с режущей частью и т. п.

### **2.3.3.2 Конструктивные признаки инструмента.**

Группа 9 характеризует конструктивные признаки инструмента по целостности и виду соединения частей и элементов:

9.1 – цельный или монолитный (инструмент, изготовленный из одной заготовки);

9.2 – составной (инструмент с неразъемным соединением его частей и элементов);

9.3 – сборный (инструмент с разъемным соединением его частей и элементов, которые в свою очередь могут быть как цельными, так и составными).

Составной режущий инструмент или элемент может быть сварным, клееным, паяным и др. (т. е. может использоваться любое, конструктивно и технологически оправданное, неразъемное соединение).

Особым случаем формирования рабочей части инструмента является нанесение износостойких покрытий или наваривание инструментального материала (неразъемное соединение).

### **2.3.3.3 Соотношение процессов резания и пластического деформирования.**

Группа 10 характеризует тип инструмента по соотношению процессов резания и / или пластического деформирования:

10.1 – режущий инструмент;

10.2 – режуще-деформирующий инструмент;

10.3 – деформирующе-режущий инструмент;

10.4 – деформирующий инструмент.

•• **Режущий инструмент.** Для этого типа инструментов преобладающим является процесс резания — снятие стружки при несущественных остаточных деформациях поверхностного слоя детали. Режущий инструмент принято разделять на лезвийный (резцы, фрезы, сверла, зенкеры, развертки, протяжки, прошивки и др.) и абразивный (шлифовальные круги, сегменты, бруски и др.). В результате механической обработки резанием поверхностные слои

пластически деформируются при их превращении в стружку, что сопровождается их упрочнением (наклепом) и формированием в них остаточных напряжений.

•• **Режущо-деформирующий инструмент.** Такой тип инструмента совмещает в себе режущие и деформирующие элементы. Например, режущо-деформирующая протяжка, метчик-раскатник и др.

•• **Деформирующе-режущий инструмент.** Для инструментов этого типа преобладающим является процесс пластической деформации, сопутствующий фрикционным явлениям. Например, пилы и ленты для фрикционной резки материалов, иглофрезы.

*Фрикционная резка* является примером положительного использования тепловых явлений [8]. Процесс фрикционного резания быстро вращающимся диском осуществляется путем разупрочнения обрабатываемого материала, под действием выделяющегося при трении тепла. Относительно низкая теплопроводность жаропрочных, нержавеющей сталей и титановых сплавов способствует применению этого метода, так как повышает локализацию температуры в зоне резания, увеличивая степень размягчения и разупрочнения; вращение диска создает его надежное охлаждение.

*Иглофреза* представляет собой специальную конструкцию плотной проволочной щетки [13]. Иглофрезы используют не только для очистки, но и при определенных условиях, для съема значительных слоев металла (до 4 мм за один проход). Отличительной особенностью иглофрез является большая плотность ворсовой части. Собранная под большим давлением ворсовая часть иглофрезы обладает большой жесткостью. При работе иглофрез ворсинки в силу значительной плотности и взаимного расположения отклоняются лишь на небольшой угол, представляя собой своеобразный полужесткие деформирующе-режущие элементы.

•• **Деформирующий инструмент.** Такой тип инструмента имеет только деформирующие элементы и в процессе его работы стружка не образуется. Примеры деформирующих инструментов: выглаживатели (сферические — трение скольжение, шариковые или роликовые — трение качения); накатники для накатки рифлений (прямых или сетчатых); ролики резьбовые для формирования наружной резьбы; раскатники для формирования внутренней резьбы; сверла для фрикционного бесстружечного сверления.

Группы 11÷13 расширяют понятие рабочих движений инструмента.

#### **2.3.3.4 Виды рабочих движений инструмента.**

Группа 11 характеризует виды движений в системе координат изделия:

11.1÷11.3 – прямолинейное по осям  $X, Y, Z$ ;

11.4÷11.6 – вращательное вокруг осей  $X, Y, Z$ .

Общая классификация схем резания применительно к механической обработке поверхностей впервые была разработана Г.И. Грановским [14]. Кинематические схемы учитывают возможные комбинации двух движений:

вращательного и поступательного. На этой основе классифицированы все возможные, в том числе и не нашедшие практического применения, принципиальные кинематические схемы резания (по группам): I – одно прямолинейное движение; II – два прямолинейных; III – одно вращательное; IV – одно вращательное и одно прямолинейное; V – два вращательных; VI – два прямолинейных и одно вращательное; VII – два вращательных и одно прямолинейное движение; VIII – три вращательных движения.

### **2.3.3.5 Характер рабочих движений инструмента.**

Группа 12 характеризует характер отдельных рабочих движений и их комбинаций по виду траектории результирующего движения и характеру изменения скорости:

- 12.1 – прямолинейное параллельное одной из координатных осей;
- 12.2 – прямолинейное параллельное одной из координатных плоскостей;
- 12.3 – прямолинейное пространственное (траектория — прямая линия);
- 12.4 – криволинейное плоское (траектория лежит в одной плоскости);
- 12.5 – криволинейное пространственное;
- 12.6 – поступательное;
- 12.7 – возвратно-поступательное;
- 12.8 – циклическое;
- 12.9 – осциллирующее;
- 12.10 – вероятностное;
- 12.11 – фрактальное;
- 12.12 – отсутствует.

Вероятностный тип движений имеет место при обработке свободным абразивными частицами. Фрактальное движение — может использоваться для уменьшения температурных деформаций при генеративных (аддитивных) методах формообразования.

### **2.3.3.6 Скорость рабочих движений инструмента.**

Группа 13 характеризует скорости рабочих движений:

- 13.1 – низкая;
- 13.2 – средняя;
- 13.3 – высокая.

Уровень скоростей рабочих движений инструмента целесообразно согласовать со скоростями при традиционной обработке резанием: низкая – менее  $10^{-5}$  м/с соответствует уровню линейных скоростей износа инструмента; средняя –  $10^{-5} \div 1$  м/с — применяемым скоростям подач; высокая – более 1 м/с — скоростям резания. Значения интервалов в достаточной мере условны с учетом существенной разницы скоростей рабочих движений при лезвийной и абразивно-алмазной обработке.

### **2.3.3.7 Жесткость рабочей части инструмента.**

Группа 14 характеризует условную жесткость рабочих элементов инструмента:

14.1 – жесткий (режущий и деформирующий инструмент);

14.2 – полужесткий (иглофрезы);

14.3 – маложесткий (инструмент для полирования и финишной обработки);

14.4 – условно нежесткий (струйная или струйно-абразивная обработка, магнитно-абразивной обработка, виброабразивная обработка)

### **2.3.4. Комплекс признаков формообразования**

Комплекс формообразующих признаков был рассмотрен как замыкающий и включает в себя 4 группы:

– метод размерного формообразования;

– главный физический процесс, определяющий размерное формообразование;

– характер формообразования;

– состояние части материала объекта, удаленного в процессе формообразования.

#### **2.3.4.1 Классификация формообразующих поверхностей деталей.**

Современные сложные машиностроительные изделия характеризуются многообразием форм обрабатываемых поверхностей. Это приводит к сложности принятия технологических решений при выборе рационального интегрированного процесса обработки. Необходимо использовать научно-обоснованную классификация поверхностей изделий, включающую определенную систему геометрических признаков.

Геометрическая классификация поверхностей необходима для систематизации известных способов формообразования поверхностей при механической обработке изделий. Такая классификация должна учитывать требования технологии изготовления изделий. Она необходима для упрощения исследования сложных поверхностей и изучения их геометрической структуры. На базе такой классификации можно создать системы технологической подготовки ресурсосберегающего производства сложных машиностроительных изделий.

В настоящее время невозможно разработать универсальную классификацию поверхностей. Внутри каждого способа образования поверхностей существует свои классификационные признаки, например, в кинематическом способе образования поверхностей целесообразно в основу систематизации положить вид образующих и закон их перемещений.

Существуют классификации поверхностей, группирующих их по определенным признакам в однотипные семейства для нормализации и типизации технологических процессов изготовления. Вопросы систематизации и классификации поверхностей рассматривались рядом

авторов, в частности Н.Н. Головановым [15] и И.А. Дружинским [16, 17]. На базе их работ можно выделить следующие группы классификационных признаков: по степени сложности поверхностей; по форме образующей и направляющих; по способу построения поверхностей.

Обобщенная схема классификации, представлена на рис. 2.1. Классификация основных типов поверхностей машиностроительного назначения основана на следующих работах [15 - 17].

Следует отметить, что вторая группа [16, 17], использующая форму образующей и направляющей, позволяет классифицировать поверхности машиностроительных изделий. Третья группа [15] – по способу построения, позволяет классифицировать поверхности по их математическому описанию.

Во второй и третьей группах (рис. 2.1) отражены лишь наиболее распространенные группы поверхностей. Изначально поверхности могут быть построены либо по локальной системе координат и скалярным параметрам, либо по характерным точкам или линиям. Далее эти поверхности могут быть продлены или усечены. Рассмотренные поверхности имеют прямоугольную или треугольную области определения параметров. На их базе можно построить ограниченные контурами поверхности произвольной формы.

Поверхности с произвольной границей представляют собой наиболее общий тип — ограниченные контурами поверхности. Их можно построить на основе любой поверхности с прямоугольной или треугольной областью определения путем изменения ее параметров. Такие поверхности лежат в основе моделирования тел. Параметры могут принимать значения только внутри области, ограниченной заданными на ней контурами.

Применение в изделиях поверхностей сложной формы обычно вызвано необходимостью реализации определенных функциональных свойств [16], например:

– обеспечение высоких коэффициентов полезного действия (КПД) энергетических установок, в которых работает деталь или изделие (лопасти водяных турбин, гребные винты кораблей, лопатки паровых турбин, крыльчатки газовых турбин и др.);

– придание определенной формы исходя из условий расчета напряжений (форма лопастей рабочих колес водяных турбин, сечения полотен рабочих колес паровых турбин и др.).

Форма поверхности, которая выбирается конструктором, всегда подчинена определенной цели, зависящей от назначения детали или изделия, среды, в которой они работают, материала, размеров и т. д. — т. е. является функциональным назначением. При описании поверхности детали дополнительно указываются ее геометрические и механические характеристики качества. На чертеже эти показатели задаются в виде допустимых предельных отклонений (размеров, относительного положения и отклонений от правильной геометрической формы), допустимыми значениями шероховатости обработанной поверхности  $R_a$  /  $R_z$  и твердостью.

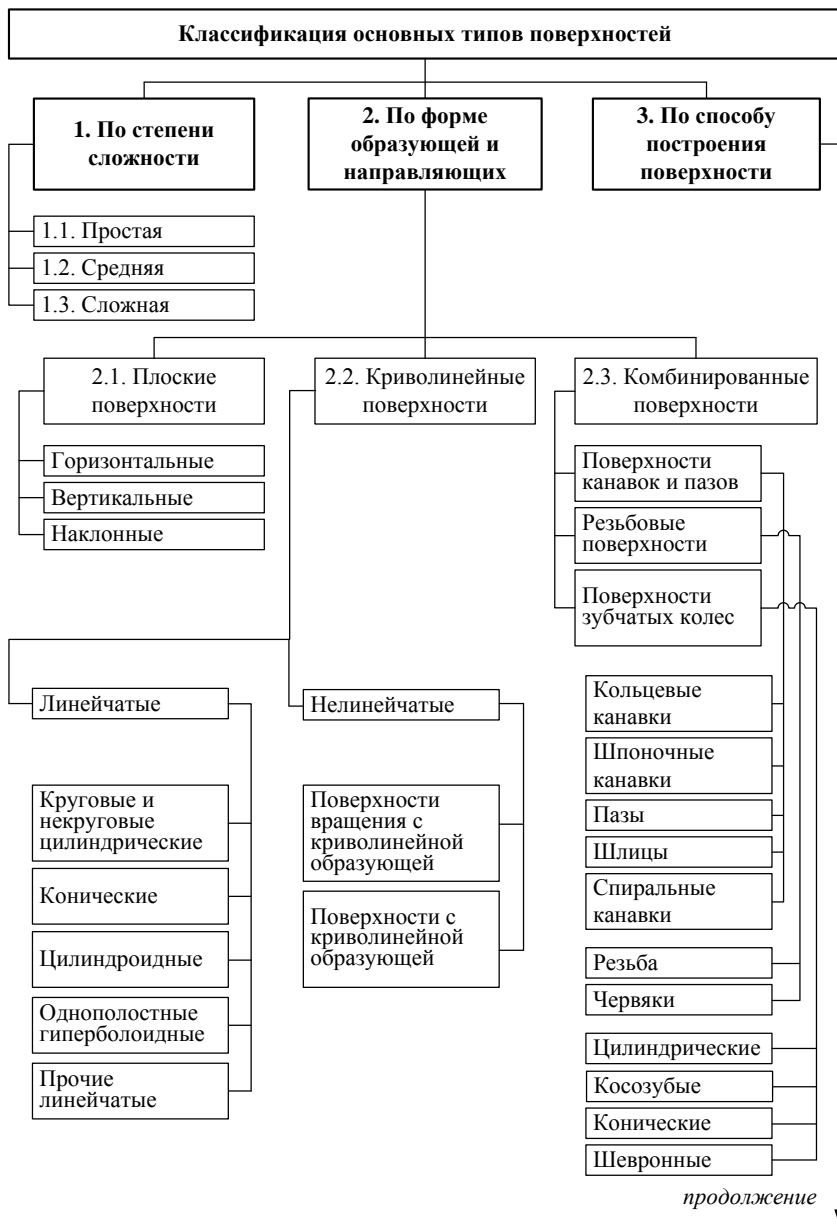


Рисунок 2.1 – Классификация основных типов поверхностей изделий машиностроительного назначения

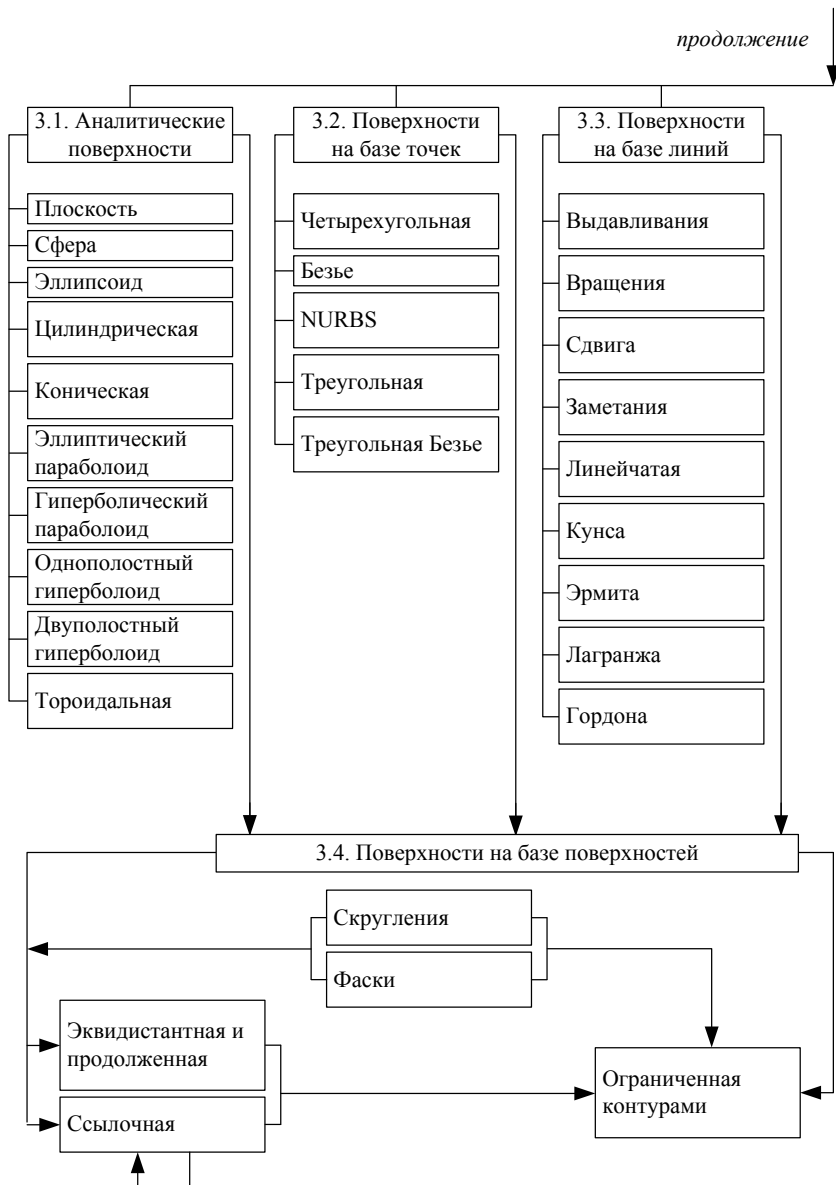


Рисунок 2.1 – Классификация основных типов поверхностей изделий машиностроительного назначения (продолжение)

#### **2.3.4.2 Элементы теории формообразования.**

Вопросы формообразования поверхностей резанием достаточно подробно рассмотрены П.Р. Родиным [18] и Б.А. Перепелицей [12].

Механическая обработка состоит из двух взаимосвязанных процессов: процесса срезания припуска и процесса формообразования.

*Формообразование* — это образование требуемой формы детали, определяемой геометрическим характером и взаимным расположением ограничивающих ее поверхностей, а также параметрами макро- и микрогеометрии.

Если рассматривать задачу чисто геометрически, без учета сил, тепловых явлений, износа инструмента и технологических особенностей процесса, то формообразование — это получение заданных чертежом поверхностей детали.

Формообразование осуществляют формообразующие элементы (точки, линии или поверхности), принадлежащие инструменту и контактирующие с поверхностью детали при обработке. При обработке резанием формообразующими являются точки или линии на режущих кромках, а при обработке давлением формообразующими являются рабочие поверхности инструментов. Формообразующая поверхность используется и при резании, но лишь условно, в качестве промежуточной инструментальной поверхности. Непосредственный контакт с поверхностью детали осуществляют контактные элементы, расположенные на формообразующих элементах. Контактными элементами могут быть точки, линии или поверхности. Контактный элемент может быть фиксированным (неизменно расположенным) на формообразующем элементе, текущим (изменяющим положение) или полностью совпадающим с формообразующим элементом.

В процессе формообразования инструмент совершает относительно обработанной детали *формообразующие движения (ФД)* и, контактируя с поверхностью детали своими формообразующими элементами, производит формообразование.

Таким образом, процесс формообразования включает в себя: деталь с ограничивающими ее поверхностями - поверхность детали Д; инструмент с формообразующими элементами - исходная инструментальная поверхность И; формообразующие движения ФД - кинематика формообразования.

Методы формообразования могут различаться типами формообразующего и контактного элементов (поверхность, линия, точка); формообразующим движением; характером контактирования (непрерывное или прерывистое) и другими признаками.

#### **2.3.4.3 Метод размерного формообразования.**

Предлагаемая классификация методов размерного формообразования является достаточно условной и не заменяет классификации [12, 18], направленные в первую очередь, на проектирование сложно-профильных

режущих инструментов. Методы размерного формообразования можно разбить на три подгруппы: копирования, кинематический и комбинированный [7].

Группа 15 определяет метод формирования формообразующих поверхностей детали:

15.1 – копирования (а – формы и размеров инструмента, б – только формы);

15.2 – кинематический (точечный);

15.3 – комбинированный.

**•• Размерное формообразование методом копирования.**

Метод копирования объединяет процессы формообразования, в которых форма инструмента является определяющей. В этом случае формообразующая (калибрующая) часть инструмента рассматривается как линия или поверхность. В одних случаях (а) на детали копируется форма и размеры (мерный инструмент), в других — только форма инструмента (б).

Примеры процессов получения заданной формы и размеров только за счет геометрии инструмента (а):

– протягивание, деформирующее протягивание, прошивание, дорнование внутренних поверхностей (**ФД — прямолинейное**);

– нарезание наружной резьбы плашками круглыми, накатывание — резьбонакатными роликами (**ФД: вращательное и прямолинейное, обеспечиваемое конструкцией инструмента**);

– накатывание наружной резьбы плашками плоскими (**ФД: вращательное и прямолинейное, обеспечиваемое конструкцией инструмента**);

– нарезание внутренней резьбы метчиками, раскатывание — метчиками-раскатниками (**ФД: вращательное и прямолинейное, обеспечиваемые конструкцией инструмента**);

– сверление, зенкерование, развертывание, зенкование, цекование, доводка цилиндрических отверстий (**ФД: вращательное и прямолинейное**);

– доводка конических отверстий (**ФД: вращательное**).

Примеры процессов получения заданной формы и размеров за счет геометрии инструмента и заданного относительного расположения детали и инструмента (б): строгание, долбление, протягивание наружных поверхностей (**ФД — прямолинейное**); нарезание резьбы резцами и гребенками (**ФД: вращательное и прямолинейное**); фрезерование канавок цилиндрических прямозубых зубчатых колес профильными дисковыми и пальцевыми фрезами (**ФД: вращательное и прямолинейное**);

**•• Кинематический метод размерного формообразования.**

Кинематический метод объединяет процессы обработки поверхностей для случая, когда форма инструмента не является определяющей. В таких случаях формообразующая (калибрующая) часть инструмента

рассматривается как точка, имеющая заданную траекторию движения относительно детали — форма инструмента не рассматривается, т. к. не оказывает влияния на поверхность детали. Формообразующая точка — точка контакта калибрующего элемента инструмента с поверхностью детали. Положение такой точки в инструментальной системе координат будет постоянным для случая обработки плоскостей и тел вращения с прямоугольной образующей.

Примеры процессов получения заданной формы и размеров за счет траектории движения формообразующей точки инструмента: *строгание плоских поверхностей (ФД — два прямолинейных)*; *точение и растачивание цилиндрических поверхностей (ФД: вращательное и прямолинейное)*; *точение и растачивание конических поверхностей (ФД: вращательное и два прямолинейных)*; *фрезерование плоскостей торцовыми фрезами (ФД: вращательное и прямолинейное)*.

**•• Комбинированный метод размерного формообразования.**

Комбинированный метод объединяет процессы формообразования, в которых форма поверхности детали образуется в результате совмещения копирования исходной инструментальной поверхности и заданных формообразующих движений. Комбинированный метод отличается от метода копирования добавлением еще одного формообразующего движения. Одной из разновидностей комбинированного метода формообразования является метод обкатки при обработке зубчатых колес. При обработке методом обкатки поверхности зубьев получают в результате обработки инструментом, режущие кромки которого представляют собой профиль сопряженной рейки или профиль зуба сопряженного колеса, и во время обработки инструмент с заготовкой образует сопряженную (правильно зацепляющуюся) зубчатую пару.

Примеры процессов формообразования комбинированным методом: *точение и растачивание фасонных поверхностей с непрямолинейной образующей (ФД: вращательное и два прямолинейных)*; *фрезерование винтовых канавок дисковыми фрезами (ФД: вращательное и одно или два прямолинейных)*; *фрезерование сложных поверхностей фасонными пальцевыми фрезами (ФД: вращательное и три прямолинейных)*.

Примеры процессов формообразования комбинированным методом обкатки: *фрезерование зубчатых колес и шлицевых валов червячными фрезами (ФД: два вращательных и одно прямолинейное)*; *зубодолбление — строгание зубьев инструментом в виде зубчатого колеса (долбяка), контур торца зубчатого венца которого служит режущей кромкой (ФД: два вращательных и одно прямолинейное)*; *шевингование зубчатых колес дисковым шевером — многолезвийным инструментом в виде зубчатых колес с лезвиями на боковых поверхностях его зубьев, для обработки боковых поверхностей зубьев, при которой для осуществления резания используется относительное скольжение (ФД: два вращательных)*; *шлифование эвольвентных зубьев тарельчатыми кругами (ФД: вращательное и прямолинейное)*.

#### **2.3.4.4 Главный физический процесс, определяющий размерное формообразование.**

Группа 16 характеризует основные физические процессы, определяющие размерное формообразование (размерный сьем материала, размерную деформацию, размерное соединение частиц и т. п.):

16.1 – пластическая деформация;

16.2 – хрупкое разрушение (скалывание);

16.3 – плавление (отвердевание);

16.4 – испарение (конденсация);

16.5 – химическое растворение;

16.6 – электролиз растворов или расплавов;

16.7 – кристаллизация из растворов или расплавов;

16.8 – направленное взаимодействие наэлектризованных или намагниченных частиц;

16.9 – взаимодействие диспергированных частиц и связывающих материалов;

16.10 – ядерные преобразования вещества.

При обработке резанием лезвийным и абразивным инструментом будут иметь место пластическая деформация и хрупкое разрушение. В случае полирования или доводки может иметь место химическое воздействие активных сред. Поверхностно-упрочняющая обработка (деформирующее протягивание, выглаживание, раскатка и др.) — пластическая деформация. Интегрированные методы обработки с использованием дополнительных физико-химических воздействий могут включать в себя процессы плавления, испарения и химические реакции и др. Генеративные (аддитивные) методы могут включать в себя процессы, связанные с добавлением материала при размерном формообразовании.

#### **2.3.4.5 Характер формообразования.**

Группа 17 характеризует основной процесс формообразования:

17.1 – удаление материала заготовки;

17.2 – изменение расстояния между точками твердого тела;

17.3 – нанесение (наращивание) материала.

Удаление материала заготовки соответствует процессам обработки материалов резанием. Изменение расстояния между точками твердого тела — методам поверхностно-упрочняющей обработки (деформирующее протягивание, выглаживание, раскатка и др.). Нанесение (наращивание) материала соответствует методам генеративных (аддитивных) технологий. В контексте рассматриваемых вопросов — это нанесение износостойких покрытий на инструмент и защитно-декоративные покрытия поверхности детали для защиты от коррозии и придания эстетического внешнего вида.

#### **2.3.4.6 Состояние части материала объекта, удаленного в процессе формообразования.**

Применительно к интегрированным процессам обработки в качестве обрабатываемого объекта может выступать как обрабатываемая деталь, так и инструмент. Например, при формообразовании (правке) рабочей поверхности шлифовальных кругов объект — инструмент.

Группа 18 определяет физическое состояние части материала объекта, удаленного в процессе формообразования (состояние «стружки») [7].

18.1 – твердое (обработка резанием лезвийным и абразивным инструментом с закрепленными режущими элементами);

18.2 – твердое диспергированное (обработка резанием хрупких материалов, обработка свободными абразивными зернами);

18.3 – в расплаве (при использовании в качестве СОТС расплавов);

18.4 – в жидком растворе (при электрохимическом растворении);

18.5 – капельно-жидкое (при введении электрической энергии с протеканием электроэрозионных процессов);

18.6 – парообразное (при введении лучевой энергии);

18.7 – газообразное ионизированное (при введении электрической энергии с протеканием электроэрозионных процессов);

18.8 – газообразное нейтральное (при введении лучевой энергии);

18.9 – исходное состояние не изменяется (обработка резанием и пластическим деформированием);

18.10 – «стружка» отсутствует (обработка пластическим деформированием).

Знание конечного состояния отходов позволяет составить энергетический баланс процесса формообразования [7]. Чем выше энергосодержание «стружки» (газ, пар, жидкое состояние, твердое диспергированное вещество и т. д. по степени снижения внутренней энергии), тем более энергоемок процесс в целом.

Энергоемкость процесса формообразования интегрированными методами обработки имеет тенденцию к снижению в следующих случаях:

– чем меньше материала заготовки переходит в «стружку» и чем ниже ее энергосодержание;

– чем меньше изменений вносится в материал изделия по сравнению с исходным материалом заготовки;

– чем меньше происходит потеря энергии в окружающую среду.

Предложенная классификация позволяет с единых позиций рассматривать и оценивать характеристики различных интегрированных процессов обработки материалов. Классификационные признаки и их группирование, не заменяют, а дополняют различные существующие системы классификации отдельных процессов, методов и способов обработки материалов.

**Вопросы для самостоятельного контроля**

1. На какие основные группы делятся целевые рабочие процессы изготовления изделий в машиностроении?
2. Назовите основные рабочие процессы формообразования.
3. В чем заключаются недостатки процесса формообразования при восстановлении изношенной поверхности изделия методом ЭЭЛ?
4. В чем заключается интегрированная технология восстановления изношенной поверхности изделия путем нанесения металлополимерных материалов?
5. Перечислите основные целевые рабочие процессы изготовления изделий.
6. Охарактеризуйте тенденции развития методов обработки материалов резанием.
7. Назовите основные принципы создания интегрированных процессов обработки материалов резанием.
8. Приведите примеры интегрированных процессов обработки материалов резанием.
9. Чем абразивная обработка отличается от лезвийной?
10. Чем обработка резанием отличается от обработки давлением?
11. Перечислите виды энергии, непосредственно подводимой к объекту.
12. Проведите сравнительный анализ видов энергии, определяющей образование формы.
13. Какие особенности имеет подвод энергии и распределение ее в пространстве, занимаемом объектом?
14. Охарактеризуйте комплекс технологических признаков.
15. Оцените взаимосвязь конструктивных элементов инструмента.
16. Как соотносятся процессы резания и пластического деформирования в интегрированных технологиях?
17. Перечислите основные виды рабочих движений инструмента.
18. Как влияет жесткость рабочей части инструмента на процесс обработки?
19. Назовите основные принципы классификации формообразующих поверхностей деталей.
20. Охарактеризуйте базовые элементы теории формообразования.
21. Перечислите физические процессы, определяющие размерное формообразование.
22. Как влияет состояние части материала объекта, удаленного в процессе формообразования на энергоемкость процесса?

**Список литературы к главе 2**

1. Лоладзе Т.Н. Основные вопросы оптимизации технологии машиностроительного производства. Монография. – Тбилиси: Сабчота Сакартвело, 1987. – 252 с.
2. Интегрированные генеративные технологии: учеб. пособие [для студ. выс. учеб. заведений] / А.И. Грабченко, Ю.Н. Внуков, В.Л. Доброскок [и др.]; под ред. А.И. Грабченко. — Харьков: НТУ "ХПИ", 2011. — 416 с.
3. Основы теории резания материалов: учебник [для высш. учебн. заведений] / Мазур Н.П., Внуков Ю.Н., Грабченко А.И., Доброскок В.Л., Залого В.А., Новоселов Ю.К., Якубов Ф.Я.; под общ. ред. Н.П. Мазура и А.И. Грабченко. — 2-е изд., перераб. и дополн. — Харьков: НТУ "ХПИ", 2013. — 534 с.
4. Сущность и технологические возможности комбинированных методов обработки: Конспект лекций / А.П. Бабичев, Ю.П. Анкудимов, Т.Н. Рысева, М.А. Тamarin. — Ростов н/Д: РИСХМ, 1990. — 74 с.
5. Физические эффекты в машиностроении: Справочник / В.А. Лукьянец, З.И. Алмазова, Н.П. Бурмистрова и др.; Под общ. ред. В.А. Лукьянца. — М.: Машиностроение, 1993. — 224 с.
6. Ермаков Ю.М. Комплексные способы эффективной обработки резанием: Библиотека технолога. — М.: Машиностроение, 2005. — 272 с.
7. Электроимпульсная обработка металлов / А.Л. Лившиц, А.Т. Кравец, И.С. Рогачев, А.Б. Сосенко. — М.: Машиностроение, 1967. — 294 с.
8. Подураев В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов. — М.: Высш. школа, 1974. — 587 с.
9. Машиностроение. Энциклопедия: В 40 т. / Машиностроение. — М., 2000. — Т. III-3: Технология изготовления деталей машин / А.М. Дальский, А.Г. Суслов, Ю.Ф. Назаров и др.; Под общ. ред. А.Г. Сулова. — 840 с.
10. Смоленцев Е.В. Проектирование электрических и комбинированных методов обработки. — М.: Машиностроение, 2005. — 511 с.
11. Большая советская энциклопедия: [в 30 т.] / гл. ред. А.М. Прохоров. — 3-е изд. — М.: Советская энциклопедия, 1969–1978.
12. Перепелица Б.А. Автоматизированное профилирование режущих инструментов (теория и алгоритмы): Учебное пособие. — Харьков: ХПИ, 1985. — 107 с.
13. Ермаков Ю.М. Состояние и тенденции развития комбинированных способов механической обработки. — М.: ВНИИТЭМР, 1985. — 48 с.
14. Грановский Г.И. Кинематика резания. — М: Машгиз, 1948. — 200 с.
15. Голованов Н.Н. Геометрическое моделирование. — М.: Изд-во Физ.-мат. лит. 2002. — 472 с.
16. Дружинский И.А. Методы обработки сложных поверхностей на металлорежущих станках. — М.-Л.: Машиностроение, 1965. — 600 с.
17. Дружинский И.А. Сложные поверхности: Математическое описание и технологическое обеспечение: Справочник. — Л.: Машиностроение, 1985. — 263 с.
18. Родин П.Р. Основы проектирования режущих инструментов: Учебник. — К.: Выща шк, 1990. — 424 с

## ГЛАВА 3. ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ПРОЦЕССЫ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

### 3.1. Резание с опережающим пластическим деформированием

На сегодня известны около 120 способов холодного пластического деформирования металлических материалов (ХПД). По характеру взаимодействия инструмента с обрабатываемой поверхностью эти способы делятся на две группы – статические и динамические. Статические способы ХПД характеризуются постоянным неразрывным контактированием упрочняющего инструмента с обрабатываемой поверхностью деталей (ОП), а для динамических характерен дискретный, короткий во времени, ударный контакт инструмента с ОП. Наиболее распространенными представителями статических способов ХПД являются деформирующее протягивание (дорнование), выглаживание, обкатывание и раскатывание с вибрациями и без них, одноосное сжатие и обработка трением.

Динамические способы ХПД делятся на три разновидности: обработки "связанным" инструментом (механическими щетками, чеканкой); упрочнение при движении инструментов по направляющим (устройствами ротационного действия); упрочнение "свободными" деформирующими телами (разновидности дробеструйного упрочнения и виброупрочнения).

*Предварительное ХПД является эффективным способом улучшения обрабатываемости пластичных металлических материалов резанием.* Физическая сущность этого явления состоит в следующем.

При повышении степени предварительного упрочнения сопротивление сдвигу на начальной границе пластической зоны будет возрастать. Однако на конечной границе пластической зоны значения сопротивления сдвигу при обработке неупрочненной и предварительно упрочненной сталей будут отличаться между собой не так значительно, как на начальной границе, что объясняется следующим образом. При значениях относительного сдвига, превышающих 0,5 – 1,0, коэффициент упрочнения  $d\tau/d\varepsilon$  сталей резко понижается ( $d\varepsilon$  – прирост деформации,  $d\tau$  – прирост сопротивления деформации). Поэтому характеристики обрабатываемого материала, как и другие факторы процесса резания, сравнительно мало влияют на механические свойства стружки, в том числе и на сопротивление сдвигу на конечной границе пластической зоны. С учетом сказанного на рис. 3.1 изображены схемы процессов стружкообразования при резании неупрочненного и предварительно упрочненного металлов (обозначения со знаком «штрих» относятся к случаю обработки упрочненного металла).

В процессе резания неупрочненного металла начальная граница пластической зоны занимает некоторое положение  $OL$ , где удовлетворяется следующее условие пластичности:

$$\tau = \tau_{s_0}, \quad (3.1)$$

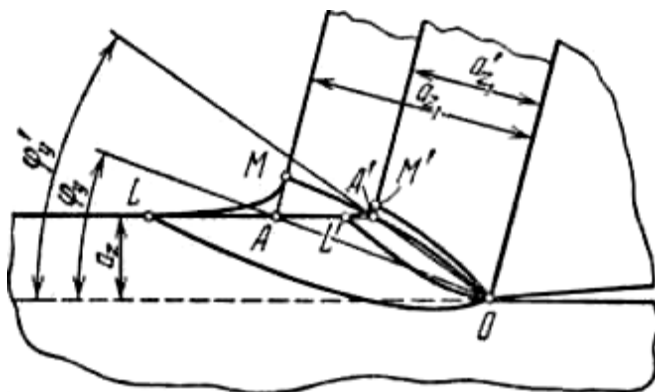


Рисунок 3.1 – Схемы процессов стружкообразования при резании неупрочненного и предварительно упрочненного металлов

здесь  $\tau$  – касательные напряжения;  $\tau_{S_0}$  – сопротивление сдвигу неупрочненного металла.

При повышении степени предварительного упрочнения обрабатываемого материала возрастает его сопротивление сдвигу и возрастают касательные напряжения, действующие на начальной границе пластической зоны. Частицы предварительно упрочненного металла проходят линию  $OL$  не деформируясь, так как действующие в этом случае напряжения недостаточны для перехода металла в пластическое состояние.

$$\tau'_{S_0} > \tau_{S_0} \quad (3.2)$$

Предварительно упрочненный металл начинает деформироваться лишь на линии  $OL$ , где удовлетворяется условие пластичности:

$$\tau = \tau'_{S_0} \quad (3.3)$$

Таким образом, начальная граница пластической зоны при повышении степени предварительного упрочнения обрабатываемого материала поворачивается вправо вокруг точки  $O$ .

Логично предположить, что сопротивление сдвигу металла стружки будет несколько выше в случае обработки упрочненного металла. Поэтому предварительное упрочнение обрабатываемого материала вызовет некоторый поворот вправо конечной границы пластической зоны  $OM$  (хотя и менее значительный, чем поворот линии  $OL$ , по указанным выше причинам).

На линиях  $OM$  и  $OM'$  заканчивается переход металла из пластического состояния в стружку и здесь удовлетворяются следующие условия пластичности:

$$\tau = \tau_{S_1}; \quad (3.4)$$

$$\tau = \tau'_{S_1}, \quad (3.5)$$

где  $\tau_{S_1}$  и  $\tau'_{S_1}$  – сопротивление сдвигу соответственно на линиях  $OM$  и  $OM'$ .

Из сказанного следует, что *повышение степени предварительного упрочнения обрабатываемого материала приводит к значительному сужению пластической зоны и увеличению угла сдвига  $\varphi_y$ , определяющего ее положение ( $\varphi_y$  – угол между плоскостью резания и условной плоскостью сдвига  $OA$ , проходящей через режущую кромку и линию пересечения наружных поверхностей срезаемого слоя и стружки [3]). Поскольку угол сдвига связан с усадкой стружки зависимостью*

$$\varepsilon = \frac{\cos(\varphi_y - \gamma)}{\varphi_y}, \quad (3.6)$$

*увеличение  $\varphi_y$  приведет к понижению усадки стружки, а, следовательно, и к уменьшению сил резания. В этом и состоит непосредственное влияние предварительного упрочнения на процесс стружкообразования.*

Кроме того, *предварительное упрочнение будет оказывать также косвенное влияние на процесс стружкообразования через другие факторы. В частности, если в процессе резания образуется нарост, то это влияние будет проявляться через изменение переднего угла  $\gamma$ , так как интенсивность наростообразования при обработке неупрочненной и предварительно упрочненной сталей может быть различной.*

Изменение механических свойств обрабатываемого материала с помощью холодного упрочнения будет оказывать воздействие на процесс стружкообразования также через угол действия  $\omega$ . Это воздействие будет осуществляться с помощью изменения ряда зависимых факторов, связанных с контактными процессами на передней поверхности. Проследим связь свойств обрабатываемого материала с углом действия  $\omega$ , определяющим направление силы стружкообразования  $R$ . Как отмечалось выше, увеличение степени предварительного упрочнения металла приведет к понижению усадки стружки. Это, в свою очередь, вызовет уменьшение длины контакта  $s$  стружки с передней поверхностью, так как усадка стружки и длина контакта, оказывают друг на друга взаимное влияние.

Длина контакта стружки и нормальная сила  $N$  на передней поверхности определяют величину среднего контактного давления  $q_N$  на этой поверхности. Однако механические свойства обрабатываемого материала обычно несущественно влияют на силу  $N$ , поскольку увеличение сопротивления сдвигу на условной плоскости сдвига сопровождается одновременным уменьшением ширины этой плоскости. Поэтому возрастание

среднего контактного давления при повышении степени предварительного упрочнения металла будет вызвано, в основном, уменьшением длины контакта стружки.

Средний коэффициент трения  $\mu$  на передней поверхности равен отношению

$$\mu = \frac{q_F}{q_N}, \quad (3.7)$$

где  $q_F$  – среднее тангенциальное контактное напряжение на передней поверхности, величина которого не всегда зависит от степени предварительного упрочнения обрабатываемого материала.

Из соотношения видно, что возрастание среднего контактного давления вызывает понижение среднего коэффициента трения  $\mu$ , и, как следствие, уменьшение угла действия  $\omega$  в силу существования зависимости

$$\omega = \eta - \gamma \quad (3.8)$$

здесь  $\eta$  – угол трения,  $\eta = \arctg \mu$ .

Угол действия  $\omega$  оказывает значительное непосредственное воздействие на процесс стружкообразования. Физический смысл воздействия заключается в том, что изменение угла  $\omega$  характеризует изменение напряженного и деформированного состояний зоны стружкообразования. Уменьшение угла  $\omega$  означает поворот вектора силы стружкообразования  $R$  и пластической зоны по часовой стрелке и увеличение угла сдвига  $\varphi_y$  (см. рис. 3.1, 3.2), в результате уменьшается деформация материала, усадка стружки, сила резания и т. д. Таким образом, *предварительное упрочнение обрабатываемого материала, вызывая уменьшение угла действия  $\omega$ , облегчает процесс стружкообразования.*

Сравнивая взаимосвязь факторов в процессах резания упрочненного и неупрочненного металлов, следует учитывать также и температуру резания, которая, очевидно, будет понижаться при повышении степени предварительного упрочнения обрабатываемого материала вследствие уменьшения деформации металла в пластической зоне и сокращения пути трения стружки по передней поверхности, вызванного уменьшением длины контакта. Однако эта разница температур несколько уменьшится за счет ухудшения условий теплопровода (вследствие уменьшения длины контакта) в случае обработки упрочненного металла по сравнению с неупрочненным. Наличие разницы в температурах вызовет дополнительные отличия в процессах обработки неупрочненного и упрочненного металлов, так как с одной стороны, температура резания воздействует через нарост на передний угол, а с другой – через сопротивление сдвигу в контактном слое стружки и средний коэффициент трения на угол действия. Однако значительное различие в процессах стружкообразования, вызванное воздействием

температуры резания на коэффициент трения, можно ожидать лишь при значительном различии механических свойств в диапазоне температур, при которых происходит разупрочнение обрабатываемого металла. Для сталей эти температуры равны 500 – 900 °С.

На рис. 3.2 показана схема сил, действующих в процессе свободного ортогонального резания упрочняемых металлов. На этом рисунке имеются такие обозначения:  $R_{yz}$ ,  $P_z$  и  $P_y$  – сила резания и ее составляющие (вертикальная и горизонтальная);  $P_1$  и  $P_2$  – вертикальная и горизонтальная составляющие силы стружкообразования;  $P_t$  – касательная сила на условной плоскости сдвига;  $F$  – сила трения на передней поверхности;  $N_1$ ,  $F_1$ ,  $R_1$  – нормальная сила, сила трения на задней поверхности, а также их равнодействующая;  $a_z$  – толщина стружки. Сила стружкообразования для удобства условно перенесена с передней поверхности на режущую кромку инструмента.

Из рис. 3.2 видно положение углов сдвига и действия, а также влияние силы стружкообразования и сил на задней поверхности на составляющие силы резания, измеряемые динамометром. Схема резания упрочняемых металлов (рис. 3.2) является упрощенной, так как зона сдвига (стружкообразования) представлена плоскостью сдвига. Кроме того, эта схема не учитывает наростообразование.

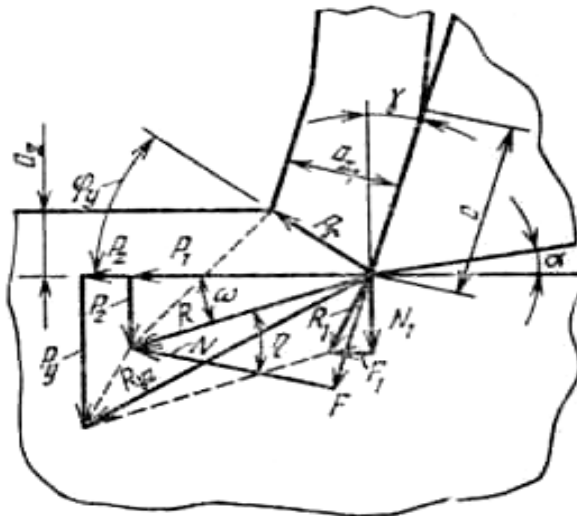


Рисунок 3.2 – Схемы сил, действующих в процессе свободного ортогонального резания упрочняемых металлов

Нарост – это особое клинообразное тело, размещающееся на передней поверхности режущего клина инструмента. Нарост формируется исключительно из обрабатываемого материала при самоорганизации технологической системы "обрабатываемый материал – режимы резания (скорость резания – подача – глубина резания) – среда – инструментальный материал". Нарост существует в диапазоне скоростей резания 1 – 55 м/мин и исчезает при температурах резания 550 – 600 °С. Ни внешняя среда, ни смазывающе-охлаждающая жидкость, ни инструментальный материал не изменяют микроструктуру нароста.

Таким образом, все низко- и среднескоростные процессы резания (протягивание, нарезание резьбы и зубьев, сверление, фрезерование быстрорежущим инструментом и другие подобные процессы) сопровождаются наростообразованием.

Твердость тела нароста может превышать начальную твердость обрабатываемого материала в 3,5 – 4 раза.

Анализ микрофотографий показывает, что процесс резания упрочненной стали 10 (рис. 3.3) характеризуется более значительными углами сдвига  $\varphi_y$  и меньшими толщинами стружки, чем процесс резания неупрочненной стали на тех же скоростях резания. Исследование корней стружки с помощью метода микротвердости показало, что повышение степени предварительного упрочнения обрабатываемого материала приводит к значительному сужению пластической зоны и увеличению угла сдвига  $\varphi_y$ , определяющего ее положение. Изложенное иллюстрируется схемами распределения микротвердости, полученными на корнях стружки.

Используя результаты измерений микротвердости  $H_\mu$  стружки, по зависимости находим значения касательных напряжений  $\tau_y$  на условной плоскости сдвига.

$$\tau_y = 0,185H_\mu \quad (3.9)$$

Расчеты показали, что повышение в два раза твердости стали, обрабатываемой холодным упрочнением, приводит к росту этих напряжений на 12 – 15%. Тип стружки не зависит от степени упрочнения металла.

Нарост имеет двоякую, т.е. позитивную и негативную роль. С одной стороны, нарост защищает инструмент от износа. В то же время, микрочастицы нароста, удаляясь через заднюю поверхность, повышают шероховатость последней.

Одним из наиболее эффективных методов борьбы с наростом является воздействие на обрабатываемый материал предварительного холодного пластического деформирования (ХПД).

ХПД существенно снижает работу деформации при обработке пластических материалов резанием.

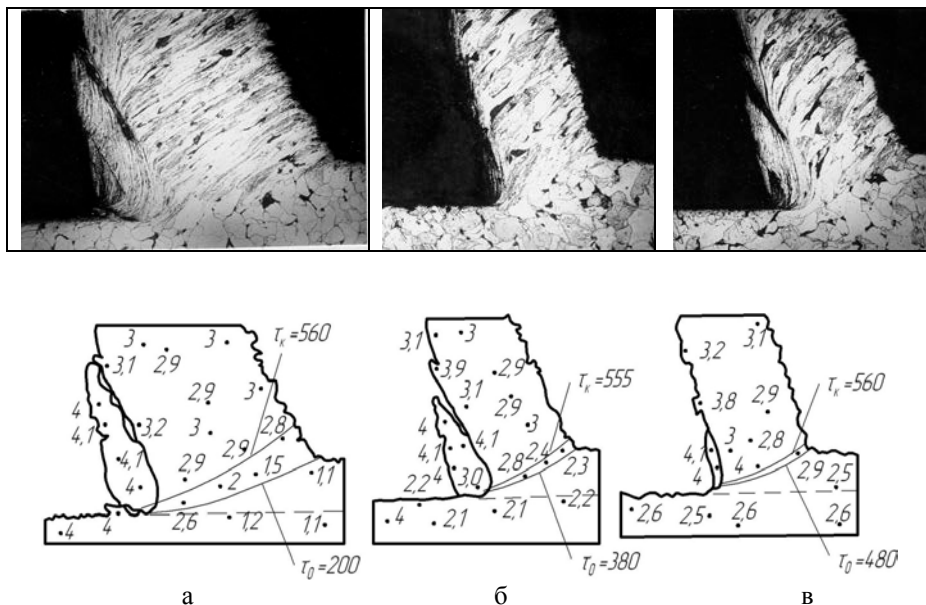


Рисунок 3.3 – Результаты исследования методами микроструктурного анализа (x50) и микротвердости зоны стружкообразования при свободном ортогональном резании стали 10 в неупрочненном (а –  $HV 1,1$  ГПа) и после ХПД (б –  $\varepsilon = 0,25$ ;

$HV 2,1$  ГПа; в –  $\varepsilon = 0,95$ ;  $HV 2,6$  ГПа) состоянии:  $v = 0,15$  м/с,  $S_z = 0,15$  мм; резец – сталь Р6М5;  $\gamma = 15^\circ$ ;  $\rho = 0,008$  мм; СОЖ – сульфозрезол; размерности характеристик НДС:  $H_{\mu}$  – ГПа;  $\tau_0$ ,  $\tau_k$  – МПа

Предварительное холодное деформирование заготовки с деформациями  $\varepsilon$  порядка 0,1 – 1 вызывает уменьшение коэффициента усадки стружки в 1,5 – 2 раза; радиуса округления тела нароста в 1,5 – 25 раз; приближение действительного переднего угла до переднего угла инструмента, полученного заточкой на 5 – 15°; до поворота зоны стружкообразования через увеличение угла сдвига на 5 – 15° и уменьшение её ширины по хорде внешней границы в 4 – 10 раз, а длины в 1,5 – 2 раза; к возрастанию сопротивления сдвигу на начальной границе зоны стружкообразования в 1,5 – 2 раза.

Таким образом, опережающее холодное пластическое деформирование является эффективным способом повышения обрабатываемости резанием пластичных металлических материалов, в частности сталей.

Если в качестве ХПД использовать деформирующее протягивание, то обработку деталей целесообразно производить по схеме деформирующе-режущего протягивания комбинированным инструментом.

## **3.2. Совмещение в одном инструменте режущих и деформирующих элементов (РЭ, ДЭ)**

*Совмещение режущих и деформирующих элементов (РЭ, ДЭ) позволяет объединить (интегрировать) стружечную и бестружечную обработку, фокусируя внимание на позитивных сторонах и достоинствах традиционных процессов, достаточно полно изученных и широко применяемых. Интеграция деформирующего протягивания и режущего открывает новые технологические возможности.*

### **3.2.1. Деформирующее протягивание**

*Деформирующее протягивание – это обработка цилиндрических отверстий заготовок из пластических металлических материалов холодным пластическим деформированием, при котором инструмент – деформирующая протяжка (ДП) – перемещается вдоль образующей по кинематической схеме скольжения. ДП, как правило, оснащена несколькими деформирующими элементами (ДЭ) кольцеподобной формы из инструментального материала высокой износостойкости, прочности, твердости и низкой склонности к схватыванию с обрабатываемым материалом.*

ДЭ делятся на группы: правящие, основные и упрочняющие. Правящие вступают в работу первыми. Эти ДЭ выполняют две функции. Во-первых, имея диаметр, который отвечает номинальному диаметру заготовки, кольцо готовят отверстие для дальнейшего основного протягивания. В случае "черной" трубной заготовки правящие ДЭ удаляют с поверхности окалину, ржавчину и частично приближают эллиптическую форму отверстия к круглой. Рабочий конус этих элементов выполняется с половиной заборного угла 4 – 6°. Во-вторых, при работе основных и упрочняющих колец элементы работают как правящие, имея цилиндрическую ленточку длиной 3 – 5 мм. Это особенно важно при протягивании деталей типа гильз. Как правило, на комбинированной протяжке достаточно иметь один правящий твердосплавный ДЭ.

Основной ДЭ полностью трансформирует некруглое отверстие в круглое (точность диаметра после работы этого кольца 0,01 – 0,02 мм) и уменьшает толщину дефектного слоя заготовки металлургического происхождения (если такой имеется) до минимально возможной, а также обеспечивает concentricity этого слоя. Кроме того, с помощью основного ДЭ выполняется большая часть пластической деформации раздачи (до 90%), чем обеспечивается упрочнение сердцевины стенки детали. Основной ДЭ имеет криволинейный рабочий профиль, за счет чего достигается равномерность нагрузки. Натяг на этот элемент определяется как половина разницы между конечным размером отверстия, от которого следует вычесть суммарный

припуск на последующее деформирующе-режущее протягивание, и диаметром правящего ДЭ.

В случае обработки стальных деталей ДЭ изготавливают из твердого сплава ВК15М. Натяг на ДЭ – это половина разницы между диаметром последнего и диаметром отверстия перед входом ДЭ. Суммарный натяг на протяжку – это сумма натягов на все ДЭ. За счет натяга на каждом ДЭ и в целом суммарного натяга на протяжку изменяются физико-механические и геометрические характеристики поверхности отверстия, поверхностного слоя и сердцевины трубной заготовки. Так, поверхностный слой трубной заготовки толщиной до 0,2 мм за счет деформации раздачи и сдвига упрочняется до 2,5 раз, а сердцевина – на 10 – 40%. В последнем случае имеет место только деформация раздачи. Величина деформации, которая осуществляется одним ДЭ не равняется натягу, а диаметр отверстия  $d$  после протягивания может оказаться, как правило, меньшим (усадка) или, в отдельных случаях, большим (разбивка) диаметра ДЭ. Расчет упругого восстановления после ДП производят по формуле:

$$U_o = \frac{d\sigma_i}{\sqrt{3E}} \left[ \left( \frac{d}{D} \right)^2 (1 - \mu) + (1 + \mu) \right], \quad (3.10)$$

где  $\sigma_i$  – напряжения, определяемые по кривой текучести при растяжении образца из обрабатываемого материала (ОМ);  $E$ ,  $\mu$  – соответственно модуль Юнга и коэффициент Пуассона ОМ;  $D$  – внешний диаметр трубчатой детали.

Однако, уравнение (10) позволяет рассчитывать величину упругого восстановления лишь приблизительно, поскольку фактически эта величина находится в пределах (0,002 – 0,23 мм, усадка) и (0,01 – 0,22 мм, разбивка). То есть при отклонении от некруглости отверстия порядка (0,01 – 0,05) мм, что определяется точностью изготовления ДЭ, диаметр отверстия после ДП может колебаться в пределах 0,45 мм, что недопустимо для финишных и даже получистовых операций.

Таким образом, сквозное ДП трубчатых деталей с суммарными деформациями  $(1 - 10\%)d$  по предварительно не обработанной поверхности следует использовать как черновую или получистовую операцию.

### **3.2.2. Режущее протягивание**

В качестве получистовой или финишной операции используют режущее протягивание (РП), позволяющее получить поверхность 7 – 9 качества точности с шероховатостью по параметру  $Ra = 0,32 - 2,5$  мм

Особенностями РП являются: применение точного многолезвийного инструмента; обработка заготовки одновременно по всему профилю; отсутствие промежуточных звеньев между инструментом и изделием; высокая точность и низкая шероховатость обработанной поверхности; простота наладки станка и установки детали и протяжки; высокая

производительность и экономичность процесса обработки. Производительность РП 3 – 12 раз превышает производительность развертывания, фрезерования, растачивания, строгания и шлифования, поскольку в работе одновременно пребывает от нескольких сотен до нескольких тысяч мм режущих кромок зубьев протяжки. Кроме того, РП за один рабочий ход может заменить 3 – 4 черновых, получистовых и чистовых операций обработки отверстия заготовки (растачивание, зенкерование, развертывание и т.п.).

Внутреннее РП применяют для обработки цилиндрических и широкой гаммы фасонных отверстий в автотракторной, авиационной, станкостроительной и др. отраслях машиностроения при серийном и массовом производствах.

РП отверстий производится в такой последовательности: трубная заготовка или заготовка с предварительно просверленным отверстием насаживается на переднюю направляющую часть протяжки, которая своим передним хвостовиком присоединяется к тяговому патрону станка. В процессе рабочего хода инструмент протягивается кареткой станка сквозь отверстие в заготовке, которая при этом упирается в опорную плоскость станка или приспособления и удерживается в ней силой трения. Когда протяжка пройдет сквозь отверстие в заготовке, последняя удаляется из зоны обработки. После это протяжка отсоединяется от тягового патрона и занимает исходное положение при помощи вспомогательного патрона, с которым задний хвостовик инструмента соединяется автоматически. После этого цикл обработки повторяется.

Общепринятая на сегодня конструкция наиболее распространенной РП предполагает групповое срезание припуска и получила название протяжки переменного резания. При этой схеме режущие зубья работают группами и срезают слой заданной толщины за счет уширения режущей кромки последнего зуба по отношению к предыдущему. В каждой секции протяжки переменного резания прорезные зубья, равные по диаметру, имеют на задней поверхности выкружки, расположенные в шахматном порядке (рис. 3.4)

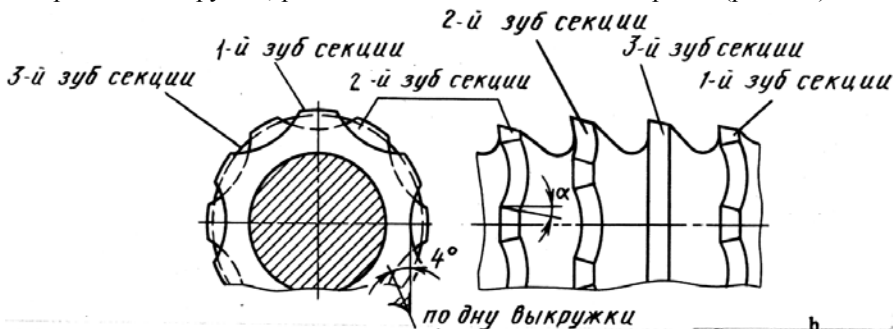


Рисунок 3.4 – Протяжка круглая с групповой схемой резания

Ширина выкружки с учетом срезания стружки равна 8 – 12 мм. Стружка имеет приблизительно прямоугольное сечение без ребра жесткости. Это улучшает условия завивания стружки и более плотное ее размещение в канавках. Последний зачищающий зуб в каждой секции выполняется без выкружек. Во избежание снятия этим зубом замкнутой кольцевой стружки его диаметр выполняется на 0,03 – 0,05 мм меньше диаметра остальных зубьев секции. Число зубьев в секции колеблется обычно от 2-х до 5-ти.

Благоприятная геометрия режущей части зубьев протяжек группового резания дает возможность увеличить подъемы на секцию зубьев при обработке сталей до 0,3 – 0,4 мм.

Деформирующее и режущее протягивания выполняются по одной и той же кинематике на одинаковых протяжных станках или прессах общего назначения, производятся с использованием современных смазывающе-охлаждающих жидкостей на масляной основе, осуществляются протяжками, требующими для механизации и автоматизации приспособлений сходной конструкции. Кроме того, предварительное ДП улучшает обрабатываемость пластичных металлических материалов, в первую очередь, сталей резанием, в особенности на низких скоростях, что характерно для РП. Выражается это в повышении допустимой степени заполнения стружечной канавки  $1/K$  инструмента в 2 – 4 раза (рис. 3.5), снижении шероховатости обработанной поверхности на 1 – 2 порядка за счет уменьшения интенсивности наростообразования, а также улучшения геометрических, физико-механических и слубебных свойств деталей.

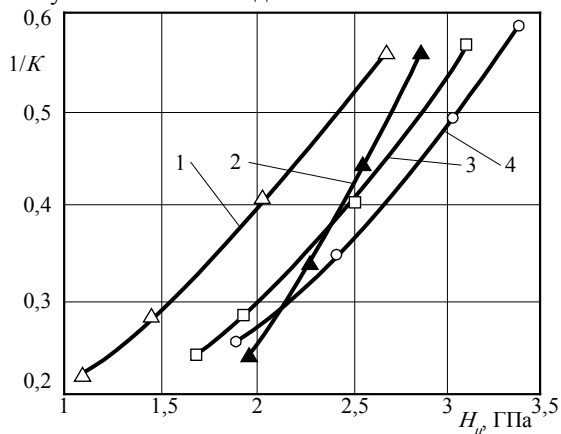


Рисунок 3.5 – Зависимости допустимой степени заполнения стружечной канавки  $1/K$  при протягивании от твердости ОМ после ХПД для сталей 10 (1), 10ГН (2), 20Г (3) и 35 (4):  $v = 0,15$  м/с;  $S_z = 0,05$  мм; резец двузубый – сталь Р6М5;  $\gamma = 15^\circ$ ;  $\alpha = 1^\circ$ ;  $\rho = 0,008$  мм;  $h_c = 5$  мм;  $t_c = 10$  мм; СОЖ – сульфифрезол

Эти положения легли в основу создания малоотходного процесса интегрированного процесса протягивание отверстий, выполняемого единым инструментом.

### **3.2.3. Интегрированное протягивание**

Интегрированная протяжка представляет традиционный стержень, оснащенный режущими и деформируемыми элементами.

Каждая отдельная секция такого инструмента состоит из группы: "деформирующий элемент – 2–3 режущих зуба", причем последние работают по схеме группового резания.

Начальными данными для разработки интегрированного процесса и инструмента являются: чертеж детали; информация о заготовке и обрабатываемой материале; тип производства.

Упрочняющие ДЭ располагают на оправке перед режущими черновыми, получистовыми и чистовыми секциями каждый. Их функция – упрочнить поверхностный слой заготовки, повысив его твердость. Таким образом, каждое упрочняющее кольцо готовит припуск для соответствующей режущей секции. Упрочняющие ДЭ работают с небольшими натягами (0,1 – 0,2 мм) каждый, поэтому могут иметь стандартную симметрично нагруженную коническую форму.

Деформирующую часть протяжки следует проектировать из нескольких кольцевых ДЭ, изготавливаемых из твердого сплава, лучше всего марки ВК15М, шлифованных по всем поверхностям алмазным инструментом. Рабочая поверхность ДЭ должна быть полирована алмазной пастой до шероховатости не выше  $Ra\ 0,04$ . Это необходимо для того, чтобы предохранить зону обработки от адгезионных явлений при использовании в качестве СОЖ жидкостей на масляной основе. Посадка твердосплавного кольца на стальной закаленный до твердости  $HRC\ 40\text{--}42$  стержень протяжки выполняется с зазором, не превышающим 0,005 – 0,01 мм. Это позволяет включить стержень в работу, подняв тем самым несущую способность весьма хрупкого твердосплавного кольца при жестких режимах работы инструмента.

Режущая часть протяжки состоит из черновых, получистовых, чистовой и калибрующей секций. Первые две изготавливаются по схеме группового резания кольцеподобными и размещаются на оправке после упрочняющего ДЭ каждая. Режущая часть протяжки изготавливается по соображениям прочности из быстрорежущей стали ( $HRC\ 64\text{--}65$ ) или других инструментальных сталей, которые рекомендуются для протяжек. Режущая часть шлифуется, затачивается, перетачивается и полируется инструментом из сверхтвердых материалов. Типы стружечных канавок (обычной или удлиненной формы) проектируются, исходя из марки ОМ, длины отверстия, припуска на зуб и допустимой степени заполнения стружечной канавки. Припуски на зуб (секцию) при протягивании глубоких отверстий ( $l/d \geq 6$ ) можно рекомендовать следующими: черновые секции –  $S_z = 0,05\text{--}0,08$  мм;

получистовые секции –  $S_z = 0,03 - 0,05$  мм; чистовая секция –  $S_z = 0,02 - 0,03$  мм. Количество калибрующих зубьев 5 – 6. Шероховатость рабочей поверхности зубьев не должна быть ниже  $Ra 0,16$ .

Для предотвращения продольных (осевых колебаний), которые характерны для любого вида протягивания, в комбинированной протяжке (рис. 3.6) предусмотрены демпфирующие элементы, которыми являются дистанционные (промежуточные) втулки. Обычно эти втулки служат для регулирования расстояния между ДЭ.

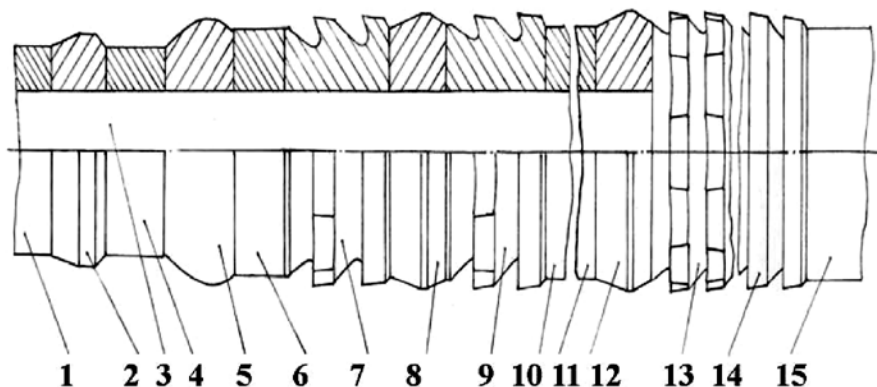


Рисунок 3.6 – Физическая модель деформирующе-режущей протяжки:

- 1 – передний хвостовик; 2 – правящий ДЭ; 3 – стержень (оправка);
- 4, 6, 10, 11 – демпфирующие втулки; 5 – основной ДЭ;
- 7, 9 – черновые режущие секции; 8, 12 – упрочняющие ДЭ;
- 13 – чистовая режущая секция; 14 – калибрующая режущая секция;
- 15 – задний хвостовик

В комбинированной протяжке втулки выполняют также демпфирующую (гасящую вибрации функцию). Для этого их изготавливают из серого чугуна, декремент колебаний (коэффициент скорости затухания) которого в 5 – 6 раз выше, чем у конструкционной стали. Оптимальным, т. е. лучшим материалом, сочетающим высокие демпфирующие свойства с прочностью, является серый чугун СЧ20 ГОСТ 1412-87 ( $HB230$ ;  $\sigma_g = 200$  МПа;  $\sigma_{изг} = 380$  МПа). Зазор между внешней поверхностью дистанционной втулки и обрабатываемой поверхностью детали должен составлять 0,2 – 0,3 мм. Вспомогательная часть комбинированной протяжки состоит из переднего и заднего хвостовиков и оправки (стержня). Эти детали изготовляют из стали 40X или 40XНМА, объемно закаленных до твердости  $HRC 40-42$ . Исключение составляют поверхности передней и задней направляющих, которые должны иметь твердость  $HRC 55-60$ . Форма головок хвостовиков

стандартная. Стержень протяжки присоединяют к чистой и калибрующей частям последней стыковой сваркой. Точность резьбы напряженных соединений элементов вспомогательной части инструмента должна соответствовать 6 – 7 квалитетам.

### **3.3. Резание с предварительной приработкой режущего инструмента**

Контактное взаимодействие при резании представляет особый вариант триботехнического процесса, отличающегося повышенными силовыми и тепловыми нагрузками, ювенильностью поверхностей, активной адгезией, высокой степенью и скоростью пластических деформаций. В результате, утвердилось мнение об исключительном разупрочнении рабочих участков инструмента в процессе резания. Однако при определенном сочетании указанных условий трущиеся поверхности инструмента не только разупрочняются, но и, претерпевая деформацию в тончайших слоях, по аналогии со всеми деформационными процессами (сжатие, растяжение, кручение и т.п.), упрочняются. [11, 12, 13]. Данные рис. 3.7. показывают, что общий уровень нагрузок (силовых, тепловых и скоростных), развиваемых при различных методах упрочняющей технологии, соответствует таковым при резании, т.е. упрочнение контактных поверхностей инструмента возможно самим процессом резания.

Такой процесс, естественно, реализуем при условии, что в инструментах, прошедших при изготовлении общепринятые режимы термических операций, резервы повышения износостойкости полностью не выбраны. И такие резервы, как правило, имеются и на это указывают следующие факты:

- стандартные инструменты, подвергнутые поверхностно-пластическому деформированию или специальным видам механо-термической обработки, обуславливают существенное повышение стойкости;

- предварительная деформация сжатием термообработанных образцов из P6M5 на HRC62...63 обнаруживает повышение условного предела текучести на 25...30 % (рис. 3.8) [13];

- предел прочности при всестороннем неравномерном сжатии как закаленных сталей У8А, У12А, 9ХС, ХВГ, так и твердых сплавов ВК6, ВК3, Т15К6, Т14К8 возрастает в 3...4 раза относительно испытаний в обычных (при одностороннем сжатии) условиях [14].

В процессе резания рабочие поверхности инструмента находятся в условиях всестороннего неравномерного сжатия и испытывают одновременное действие силовых и тепловых нагрузок.

Таким образом, самим процессом резания создаются условия для упрочнения контактных слоёв инструмента, проявляемые в их структурной приспособляемости к тепловым и силовым нагрузкам. Образующаяся при этом вторичная структура на рабочих поверхностях инструмента в значительной степени определяет его дальнейшую эксплуатационную надежность и работоспособность.

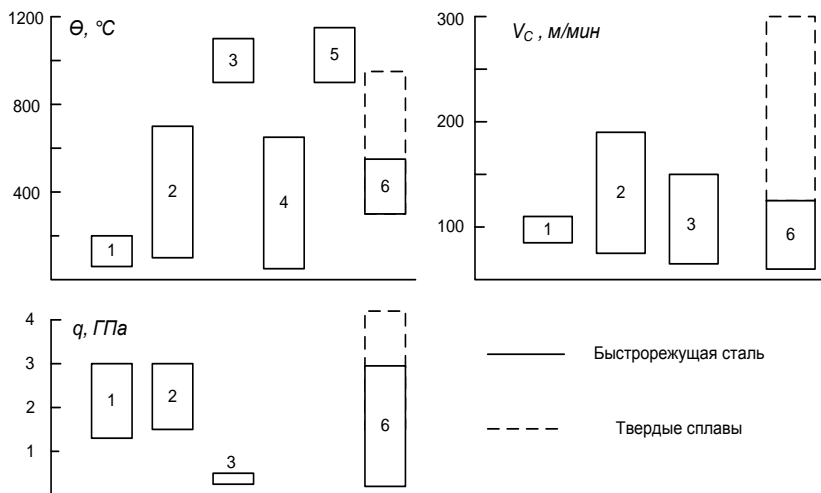


Рисунок 3.7 – Диапазоны нагрузок при различных методах упрочнения и обработке резанием (1-ППД, 2 – алмазное выглаживание, 3 – ЭМУ: электромеханическое упрочнение, 4 – МТО: механико-термическая обработка, 5 – ВМТО: высокотемпературная механико-термическая обработка, 6 – резание)

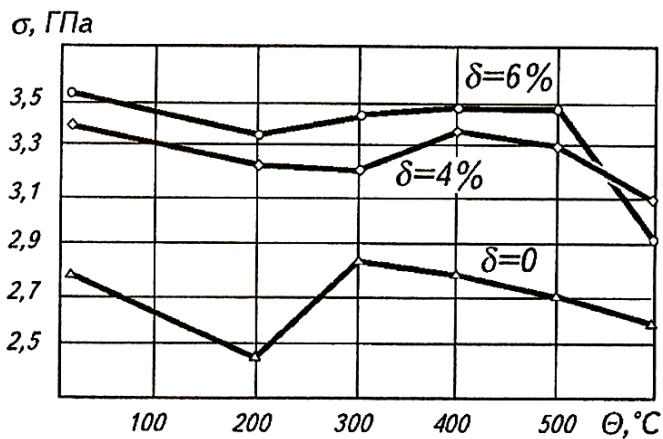


Рисунок 3.8 – Влияние предварительной деформации на условный предел текучести закаленной стали Р6М5 при различных температурах

Процессы структурной приспособляемости режущего инструмента охватывают тонкие поверхностные слои толщиной в несколько десятков микрометров. На рис. 3.9 приведены кривые распределения микротвердостей в контактных слоях инструмента, полученные стандартной термообработкой и после кратковременной эксплуатации инструмента на различных режимах резания при обработке различных по физико-механическим свойствам материалов.

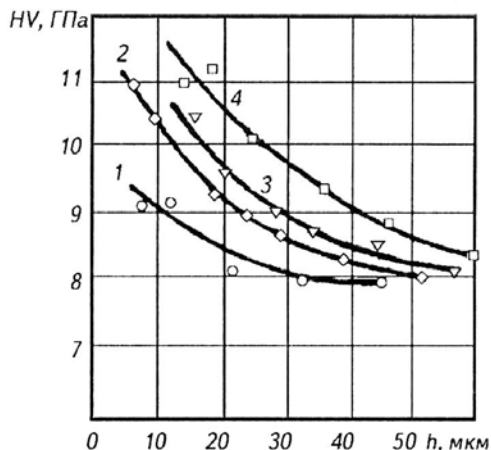


Рисунок 3.9 – Микротвердость контактных слоев реза из P6M5 после 10-минутного резания материалов: 1 – стали 45 на  $V = 0,585$  м/с; 2 – 12X18H10T на  $V = 0,08$  м/с; 3 – 12X18H10T на  $V = 0,18$  м/с; 4 – 12X18H10T на  $V = 0,25$  м/с

Микротвердость вторичной структуры, образованной в процессе контактного взаимодействия при резании, превышает исходную, полученную термообработкой, как по величине, так и глубине охвата, составляющей в среднем 30...60 мкм.

Промышленные режимы резания, назначаемые с позиций обеспечения максимальной производительности, как правило, отмеченным условием упрочнения не отвечают, так как характеризуются высокими значениями температур, стимулирующими разупрочнение контактных поверхностей инструмента. Режимы же резания, при которых стимулируются процессы упрочнения, не соответствуют в общем случае условиям производительной обработки. Поэтому эффект упрочнения инструмента самим процессом резания возможно реализовать по следующей методике.

1. При заданных начальных условиях устанавливается зависимость  $T = f(V)$  – «скорость резания – стойкость режущего инструмента»;

2. При повышенных значениях стойкости (заниженных скоростях) полученной зависимости  $T=f(V)$  осуществляется кратковременное, соответствующее начальному периоду износа (5...10 мил) резание – приработка инструмента, которая обеспечивает формирование наиболее износостойкой вторичной структуры;

3. Упрочненный приработкой (согласно п. 2) инструмент эксплуатируется в дальнейшем при повышенных режимах.

Резание по изложенной методике обнаруживает существенное (в 1,5...3,5 раза) повышение стойкости стандартных инструментов, упрочненных предварительной приработкой. Данные рис. 3.10. (приведены в качестве примера) отражают этот факт при точении, а рис. 3.11 в виде степени повышения стойкости (как отношение стойкости приработанного инструмента –  $T_p$  к обычному  $T$ ) при широких, промышленных и лабораторных условиях резания.

Эффект повышения стойкости имеет место:

– при эксплуатации основной группы инструментов (быстрорежущих, твердосплавных, безвольфрамовых, с покрытиями, эльборовых);

– при обработке различных по свойствам материалов (конструкционных, нержавеющей, титановых);

– при различных операциях (точения, фрезерования, отрезки, развертывания) и использовании различных сред.

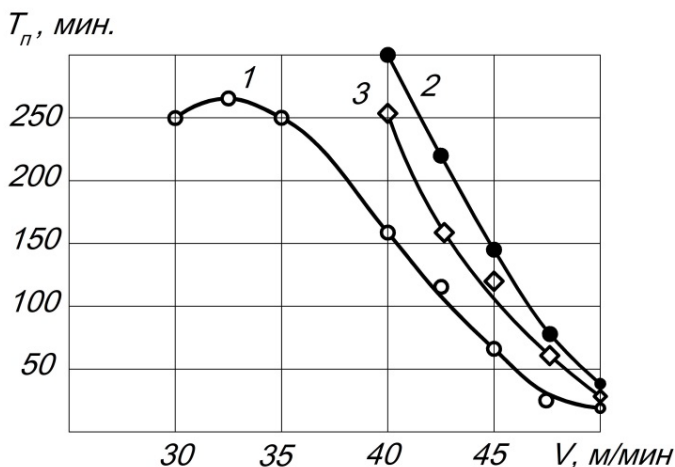


Рисунок 3.10 – Влияние предварительной приработки на стойкость резца из Р6М5 при точении стали 40Х ( $S = 0,2$  мм/об,  $t = 0,5$  мм., масло «И-20»).

1 – без приработки, 2 – с приработкой при  $V_p = 35$  м/мин.,

3 – с приработкой при  $V_p = 30$  м/мин

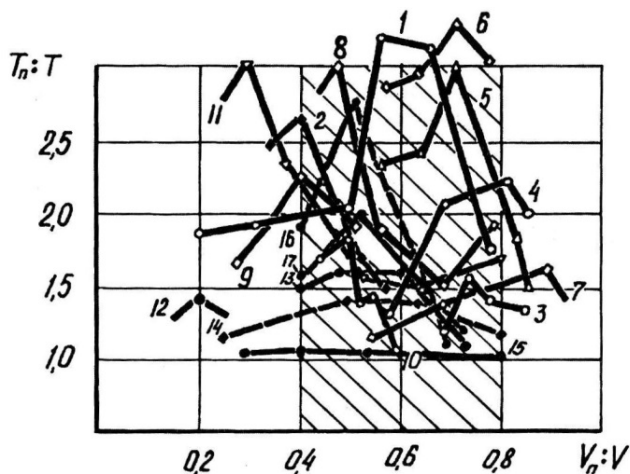


Рисунок 3.11 – Влияние предварительной приработки на степень повышения стойкости инструмента:

1 – ВТ 22-ВК8; 2 – 12Х18Н10Т-ВК8; 3 – 40Х-Р6М5; 4 – 40Х-Р18;  
 5 – 40Х- Р6М5Ф (зубофрезерование); 6 – 30ХГТ-Р9К5; 7 – 30ХГСА-Р6М5Ф  
 (зуборезная головка); 8 – 12Х18Н10Т-ТН20; 9 – сталь 45-Р18 (отрезка);  
 10 – 12Х18Н10Т-ТН20 (покрытие); 11 – 12ХГСА-Р6М5 (шлицефрезерование);  
 12 – 12Х18Н10Т-ВК8 (развертывание); 13 – 40Х-Эльбор-Р; 14 – 12Х18Н10Т-  
 Р6М5 (поршковый); 15 – У8А-ВОК60; 16 – 40Х-Т3; 17 – 40Х-Т20Н

Таким образом, предварительная приработка как способ упрочнения режущего инструмента применима практически к любому лезвийному инструменту и может быть рекомендована как один из возможных и универсальных методов повышения стойкости.

Согласно ГОСТ 18282-72 под прирабатываемостью понимается способность трущихся тел в начальный период трения постепенно изменять геометрию и физико-механические свойства поверхностных слоёв. На рабочих поверхностях инструмента этот процесс реализуется по аналогии с трением и различными упрочняющими технологиями (см. рис. 3.7) по механизму деформационного упрочнения.

Как известно, с повышением пластичности или снижением твердости способность металла к наклепу (деформационному упрочнению) растет. Исследования показали более высокую степень повышения стойкости у резцов, имеющих относительно мягкую исходную структуру (меньшую твердость), что оттеняет доминирующую роль деформационного упрочнения в процессах структурной приспособляемости контактных поверхностей при приработке (рис. 3.12).

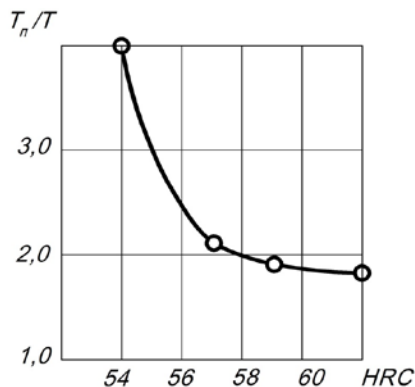
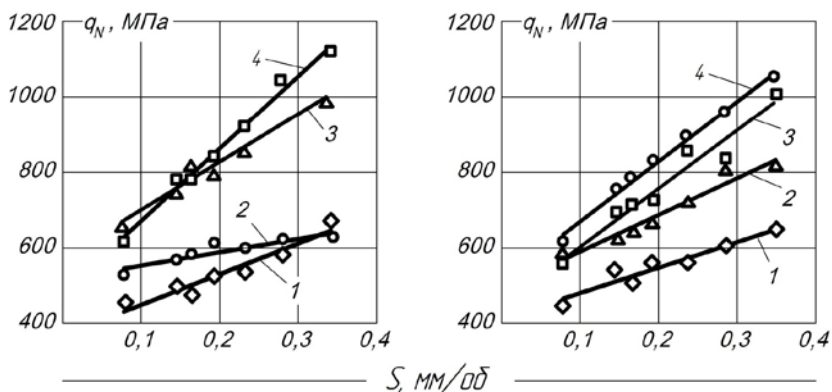


Рисунок 3.12 – Влияние приработки на степень повышения стойкости резцов различной твердости (Р6М5 – сталь 40Х,  $S=0,2$  мм,  $t=0,5$  мм; масло «И-20»)

Степень упрочнения рабочих поверхностей инструмента при предварительной приработке зависит также от уровня развиваемых давлений, которые, как известно, резко возрастают при резании закаленных и труднообрабатываемых материалов, имеющих повышенную твердость (рис. 3.13).



а)

б)

Рисунок 3.13 – Нормальные давления на передней поверхности резца из Р6М5 при приработке: **а.** 1 – стали 45, 2 – стали 30 ХМА, 3 – стали 12Х18Н10Т, 4 – сплаве ТТ. **б.** 1 – стали 45, 2 – стали 40 Х (HRC 31..32), 3 – стали 40Х (HRC 36...37), 4 – стали 40 Х (HRC 39...40)

Это положение подтверждается серией специальных экспериментов (рис. 3.14).

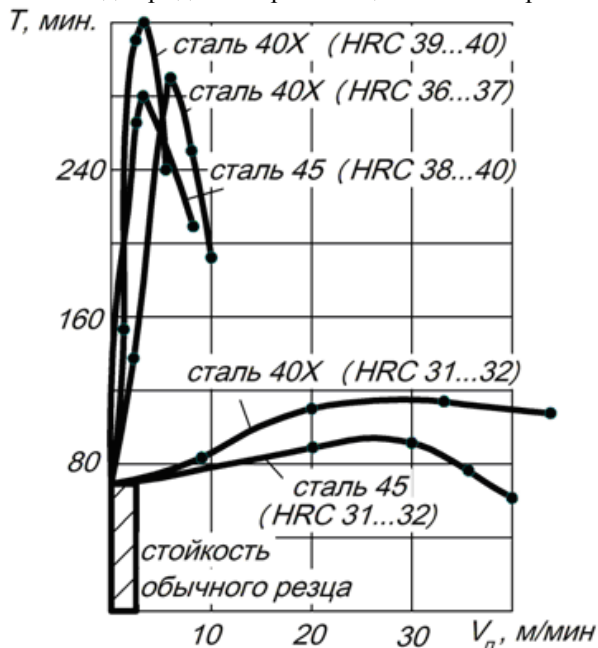


Рисунок 3.14 – Влияние условий приработки резца из P6M5 на его стойкость при резании стали 45 со скоростью  $V=70$  м/мин ( $S=0,2$  мм/об,  $t = 0,5$  мм, «Индустриальное-20»)

Обрабатывалась сталь 45, при резании которой на скорости  $V = 70$  м/мин была определена стойкость стандартного из P6M5 (неприработанного) инструмента (выделена столбиком). В дальнейшем резание этой же стали 45 в указанном режиме ( $V = 70$  м/мин) осуществлялось после десятиминутной приработки инструмента на закаленных до различной твердости сталях. С целью установления оптимальных условий приработки последняя осуществлялась на различных скоростях (по оси абсцисс отложена скорость приработки). Полученные результаты позволяют констатировать следующее.

1. Предварительная приработка инструмента на относительно малопрочной стали 45 не обнаруживает существенного повышения стойкости (ср. кривую 1 со стойкостью неприработанного инструмента).

2. При обработке закаленных сталей степень упрочнения инструмента возрастает, вследствие чего приработанный на этих материалах инструмент обеспечивает резкое повышение стойкости при резании конструкционной стали (той же стали 45).

Таблица 3.1 – Приращение плотности дислокации и упрочнения передней поверхности резцов из Р6М5 при резании с различными нагрузками

Твердость обрабатываемого материала 40X. HR C	Контактные давления		Плотность дислокаций $\rho \cdot 10^{11}, \text{см}^{-2}$	Приращение упрочнения $\Delta\sigma, \text{ГПа}$	Степень повышения стойкости
	$\sigma_N, \text{МПа}$	$\tau_F, \text{МПа}$			
29	580	345	10,08	1,29	1,4
31...32	650	415	14,79	1,58	1,7
36...37	745	550	17,44	1,76	4,0
39...40	810	680	22,05	2,1	4,5

3. При этом с увеличением твердости (ростом давлений) эффект повышается, составляя в максимуме относительно неприработанного инструмента 200...250 мин, или 4,0...4,5 раза (см. рис. 3.14 ср. кривые 3, 4, 5 со стойкостью неприработанного инструмента). Это обстоятельство указывает на деформационный характер упрочнения, которое убедительно отражается на изменении плотности дислокации.

Плотность дислокаций определялась рентгеноструктурным методом.

Приращение упрочнения рассчитывалось как

$$\Delta\sigma \approx 0,5 G \cdot b \sqrt{\rho}, \quad (3.11)$$

где  $G$  – модуль упругости, Па;  $b$  – вектор Бюргерса, м;  $\rho$  – плотность дислокаций,  $\text{м}^{-2}$

Эффект повышения стойкости после приработки на закаленных материалах проявляется на достаточно широком диапазоне скоростей приработки. Однако во всех случаях обнаруживается максимум эффекта, что подчеркивает роль тепловых процессов в деформационном упрочнении рабочих поверхностей инструмента.

Аналогичные результаты получены при резании стали 45 после предварительной приработки инструмента на труднообрабатываемых материалах (рис. 3.15).

В этом случае стойкость инструмента после приработки на специальном сплаве ТТ (высокопрочный чугун с 40% хрома) и нержавеющей стали 12Х18Н10Т повышается в максимуме еще больше – соответственно на 554 мин и 350 мин, или в 6,0 и 4,5 раза относительно резания без приработки (см. рис. 3.15, ср. кривые 3, 4 со стойкостью неприработанного инструмента). Эти данные следует оценивать также в плане реализации приработки при повышенных давлениях. Хотя 12Х18Н10Т и 30ХМА выпадают из общей зависимости давлений от твердости (см. рис. 3.13), наличие высокого эффекта связано с их повышенной упрочняемостью при деформировании в реальных условиях резания.

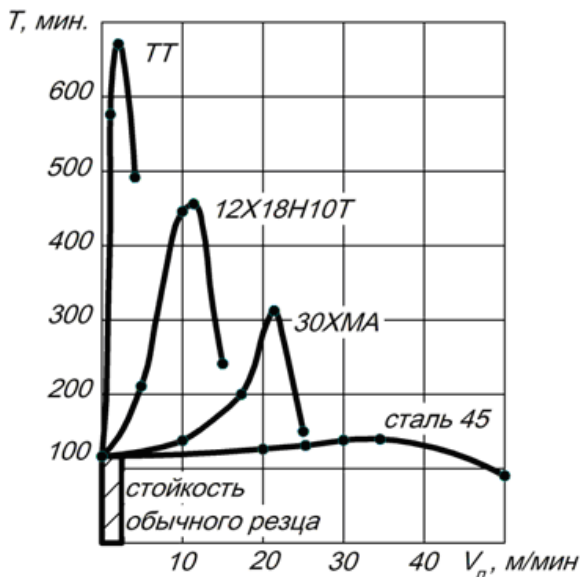


Рисунок 3.15 – Влияние условий приработки резца из Р6М5 на его стойкость при резании стали 45 со скоростью  $V_p = 70$  м/мин. ( $S = 0,2$  мм/об,  $t = 0,5$  мм, масло «Индустриальное-20»)

Техническая реализация рассматриваемого метода ограничена. Она связана с введением специальной операции, хотя столь высокие значения стойкостей могут открыть его приложимость на отдельных операциях, связанных с обеспечением размерной точности, либо на предприятиях, на которых выполняются однотипные операции на различных по свойствам материалах.

Не менее важный вывод, вытекающий из результатов этих опытов, состоит также в том, что они, оттеняя нереализованные термическими операциями внутренние ресурсы инструментальных материалов, представляют своего рода исходные данные (уровень давлений, температур и скоростей), как для установления оптимальных условий приработки, так и для совершенствования других методов, связанных с упрочнением инструмента.

Таким образом, упрочнение контактных слоев инструмента протекает в зависимости от давлений, скоростного и температурного факторов по закономерностям, характерным для деформационного упрочнения. Это дает основание для дополнительного утверждения, что в механизме повышения износостойкости контактной поверхности режущего инструмента в процессе приработки деформационное упрочнение играет важнейшую роль и

оптимальные условия приработки должны рассматриваться на основе этого механизма.

Учитывая изложенное и то, что результатом поглощенной энергии деформации является искажение параметров кристаллической решетки, были проведены рентгенографические исследования по определению степени изменения несовершенств кристаллического строения контактных слоев в процессе приработки (рис. 3.16).

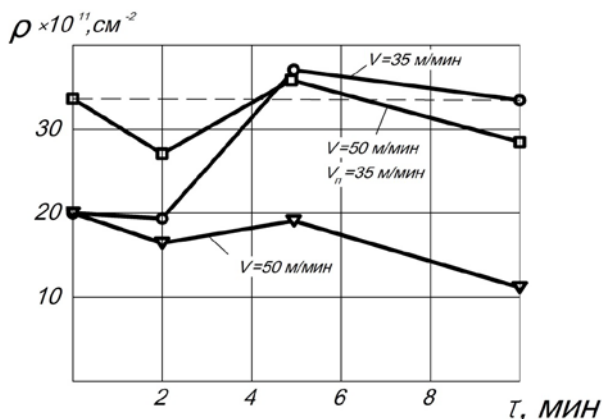


Рисунок 3.16 – Изменение плотности дислокаций в контактных слоях реза из Р6М5 при точении стали 40Х (S= 0,2 мм/об, t = 0,5 мм, масло «И-20»)

При резании со скоростью 50 м/мин в начальный момент наблюдается некоторое снижение плотности дислокации (указывающее на разупрочнение рабочих объемов инструмента), которое со временем растет, но, не достигнув первоначального исходного значения ( $\rho = 1,92 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ), опять сменяется падением. Совершенно иное поведение плотности дислокаций наблюдается при точении со скоростью  $V = 35$  м/мин, являющейся оптимальной в плане упрочнения. В этом случае незначительное разупрочнение в начальный момент резания сменяется резким повышением плотности дислокации и при выходе из зоны приработки (через 10 минут) плотность дислокаций вновь образованного контактного слоя превышает исходную более чем в 1,6 раза. Значение плотности дислокаций контактного слоя режущего инструмента, прошедшего предварительную десятиминутную приработку при  $V = 35$  м/мин и дальнейшем резании со скоростью 50 м/мин практически сохраняется по абсолютной величине и характеру изменения, значительно превышая значение плотности дислокаций исходного состояния, и тем более структуры, сформировавшейся при резании (без приработки) на 50 м/мин.

Полученные результаты позволяют отметить следующие обстоятельства, отражающие влияние процессов, протекающих при приработке, на износостойкость рабочих поверхностей инструмента:

- процесс приработки характеризуется существенной трансформацией исходной структуры рабочих поверхностей инструмента. Последние в зависимости от начальных условий при завершении приработки могут претерпевать как упрочнение, так и разупрочнение;

- значения стойкостей инструмента оказываются в значительной мере зависимыми от процессов, протекающих в начальный период износа (приработки), т.к. интенсивность нормального износа (основной составляющей стойкости) будет определяться свойствами структуры, сформированной в режиме приработки. Действительно, при резании со скоростью 50 м/мин при выходе из зоны приработки рабочие поверхности инструмента будут изнашиваться в зоне нормального износа, имея разупорядоченную относительно исходной структуру, тогда как при резании со скоростью 35 м/мин нормальному износу подвергнутся значительно упрочненные поверхности инструмента;

Упрочненные приработкой поверхности инструмента практически не теряют сформированную при приработке структуру при эксплуатации последней на более высоких режимах, что и является основным обстоятельством, позволяющим использовать предварительную приработку как метод повышения стойкости.

Электронно-микроскопические исследования, обнаружив практически все признаки деформационного упрочнения (скольжение, двойниквание, фрагментацию аустенитной и частично мартенситной фаз), подтвердили изложенные особенности трансформации свойств контактных слоев инструмента в период приработки.

Таким образом, в самом механизме износа инструмента, в периоде его нежелательного в технологическом плане интенсивного начального износа, заложены скрытые резервы повышения стойкости. Предварительной приработкой удается направленно использовать этот процесс.

Приработка инструментов достаточно универсальный метод повышения их стойкости. Однако многофакторность процесса трения и износа режущего инструмента затрудняет выбор параметров оптимизации приработки, хотя все они однозначно определяют ее как целенаправленный процесс адаптации контактных поверхностей к внешним условиям, задаваемым режимами резания.

Износ режущего инструмента является комплексным процессом разрушения, включающим множество механизмов, тесно взаимосвязанных между собой. Каждому режиму работы соответствует, как правило, своя структура, обладающая определенной сопротивляемостью к износу. Поэтому оптимальные режимы приработки должны носить индивидуальный характер

с учетом того, в каких условиях будет работать инструмент после приработки.

Особенность износа фрикционной пары и режущего инструмента заключается также в том, что прошедший предварительную приработку инструмент при работе на эксплуатационных режимах проходит как бы вторичную приработку, то есть уже приработанная структура вторично приспособляется, но уже к рабочим режимам. Поэтому предварительные режимы приработки не обязательно должны удовлетворять условию максимальной упрочняемости, а могут соответствовать условию, оптимально подготавливающему структуру контактной поверхности для упрочнения ее при работе на эксплуатационных режимах.

Возможность существования оптимальных режимов приработки вытекает из следующих соображений: если режимы приработки совпадают с рабочими, то приработка не дает никакого эффекта, точно так же не будет повышения стойкости в случае приработки на «нулевых» режимах (то есть без приработки). Следовательно, между «нулевыми» и режимами, совпадающими с рабочими, должен находиться экстремум.

Существование максимума наглядно демонстрируется на рис. 3.11; где показана степень повышения стойкости приработанного инструмента относительно неприработанного  $T_{пр}/T_p$  в зависимости от соотношения скорости приработки к рабочей скорости  $V_{пр}/V$ . Из графика следует, что режимы предварительной приработки, обеспечивающие повышение стойкости, лежат в довольно широких пределах, однако максимуму соответствует единственное значение, определение которого, к сожалению, на сегодняшний день представляет задачу, однозначно не решенную в теоретическом плане.

Поиск оптимальных режимов приработки затруднен также тем, что формирующаяся контактная поверхность не описывается полностью одним единым критерием, включающим геометрические и структурные параметры, да и сама структура характеризуется множеством параметров, большинство из которых не поддается количественному описанию, и описание их на сегодняшний день не представляется возможным. По-видимому, этим объясняется и отсутствие единых рекомендаций по осуществлению приработки узлов машин – процесса, применяемого и изучаемого давно. В работе Б.И. Костецкого [17] приводятся условия приработки двигателей, реализуемые различными автомобильными заводами страны и зарубежными фирмами. Оказалось, условия проведения приработки резко отличаются как характером нагружения (ступенчато или плавно), так и режимами (скоростями до 4-х раз и временем до 20-ти раз), что указывает на сложность процесса, выделяя отсутствие теоретических основ процесса приработки.

Естественно, в рамках настоящего исследования, рассматривающего вопросы приработки применительно к режущему инструменту впервые,

установление единых оптимальных условий приработки весьма затруднительно. Тем не менее, выполненные исследования дают возможность оценки принципиальных сторон этого вопроса и выработки соответствующих рекомендаций для реализации приработки в оптимальных условиях.

Верхние приработочные режимы можно ограничить условием, вызывающим зарождение термопластических деформаций, определив критическое значение температуры по известной формуле, рекомендуемой для решения аналогичной задачи при поверхностно-пластическом деформировании

$$\theta = \frac{\sigma_{0,2}}{E \cdot (\theta)} \quad (3.12)$$

где  $\sigma_{0,2}$  – предел текучести упрочненного материала;  $E$  – модуль упругости;  $\alpha(\theta)$  – истинный коэффициент линейного расширения.

Однако точное решение представленных зависимостей затруднено: значения  $\sigma_{0,2}$  и  $\alpha(\theta)$ , полученные статистическими испытаниями, не будут отражать реальных свойств упрочненных слоев инструмента. Поэтому рассмотрим данный вопрос на основе анализа экспериментальных результатов, полученных во взаимосвязи с принципиальными закономерностями изменения свойств металлов при деформационном нагружении.

Как указывалось выше, упрочнение при приработке протекает по механизму деформационного упрочнения. Эффект от приработки в плане повышения стойкости в соответствии с этим механизмом повышается с увеличением давления и скорости резания (см. рис. 3.15), но проявляется с максимумом при изменении температуры как бестемпературного фактора (рис. 3.17).

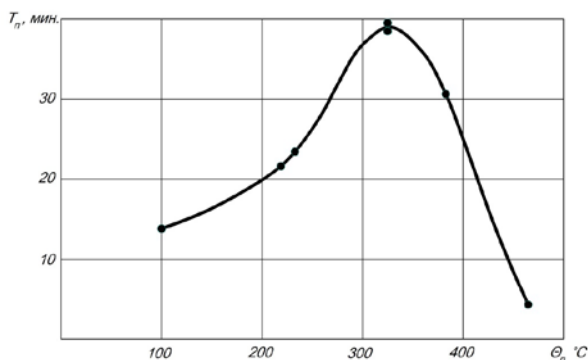


Рисунок 3.17 – Влияние температуры предварительной приработки на стойкость реза из Р6М5 при точении стали 40Х ( $S = 0,2$  мм/об,  $t = 0,5$  мм., масло «И-20»)  $V_n = 2$  м/мин - const

Изменение температуры в этих опытах при постоянной скорости приработки  $V_{\text{п}} = 2$  м/мин достигалось электроконтактным нагревом. Это дает основание для оптимизации условий приработки по температуре. Однако отмеченные три фактора в реальных условиях резания действуют взаимообусловлено, потому оптимальные условия приработки не могут соответствовать какой-то постоянной температуре. Такое заключение является естественным отражением общих закономерностей деформационных процессов, характерных для конструкционных сталей. Последние, как известно, при деформационном нагружении при определенных температурах упрочняются, обнаруживая так называемый «горб прочности» в зависимости прочности от температуры.

При этом в зависимости от условий нагружения и, прежде всего скорости деформации «горб» смещается относительно температурной оси. Анализ большого количества литературных данных показывает, что в общем случае, охватывающем различные условия деформации, область максимального упрочнения приходится на температуру 200...400°C. Для быстрорежущей стали этот процесс также имеет место и по данным [14, 15] приходится на температуру около 300°C. В исследованиях на сжатие закаленной быстрорежущей стали Р6М5 деформационное упрочнение проявляется при температурах, соответствующих 400°C.

Таким образом, учитывая, что механизм упрочнения при приработке в основном деформационный, можно ожидать, что оптимальные условия приработки также будут соответствовать указанному диапазону температур.

При проведении опытов с варьированием температуры при прочих неизменных условиях (см. рис. 3.17) было установлено, что оптимальные условия приработки соответствуют диапазону температур 250...350°C.

На рис. 3.18 представлены данные, отражающие комплексное влияние давлений, регулируемых резанием в режиме приработки различных по свойствам материалов, и температуры, как производной от скорости резания, на стойкость инструмента.

Стойкостные опыты проводились на стали 45, приработка же инструмента осуществлялась на отмеченных (на рисунке) материалах, включая и сталь 45.

Полученные данные показывают, что эффективность приработки зависит как от уровня давлений, так и от температурно-скоростного фактора. Максимальный же эффект определяется сочетанием указанных факторов. Однако ценным результатом данных опытов можно считать то, что в общем случае оптимальные условия приработки приходятся на температурный диапазон, в 200...320°C, то есть совпадают с температурным диапазоном, соответствующим проявлению упрочнения при деформационных процессах. Это обстоятельство позволяет оптимизировать процесс приработки по температуре.

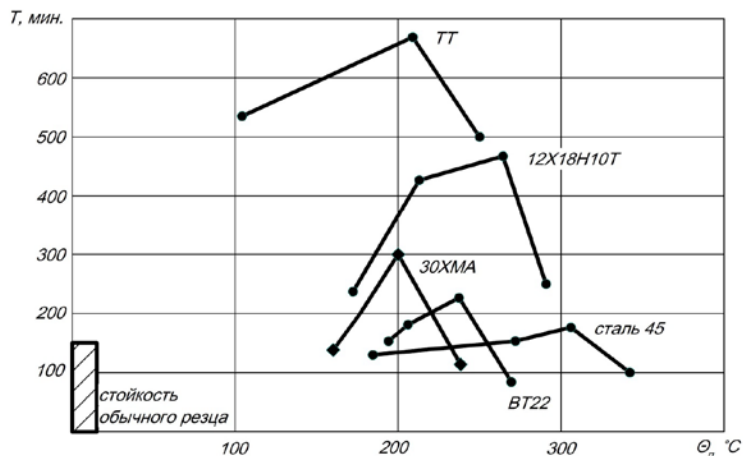


Рисунок 3.18 – Влияние условий приработки на стойкость инструмента Р6М5 при точении стали 40X на  $V = 1,6$  м/с

Необходимо отметить, что оценка результатов большого количества опытов обнаруживает в общем случае оптимальный температурный интервал приработки быстрорежущего инструмента также в диапазоне 200... 350 °С.

Проявление данного процесса в приложении к деформируемым объемам инструмента в реальных условиях резания можно объяснить следующим образом. Скорость пластического течения контактных слоев инструмента имеет градиент по глубине. Поэтому, по крайней мере, на некоторой глубине от поверхности трения условия деформации должны соответствовать условию проявления «горба прочности» при статистических методах нагружения. Такое положение, видимо, и играет решающую роль в том, что при самых различных условиях нагружения оптимальные условия приработки соответствуют одному и тому же диапазону температур. В пределах же данного диапазона оптимальные значения температур будут определяться конкретными условиями нагружения и трансформированными свойствами материала инструмента.

Таким образом, температурный диапазон 200...350°С является оптимальным, при котором наиболее полно стимулируются процессы деформационного упрочнения рабочих поверхностей инструмента. При меньших значениях температур пластическая деформация контактных слоев инструмента затруднена, поэтому упрочнение реализуется слабо и, как следствие, эффективность предварительной приработки низка. При более же высоких температурах развиваются не требующие доказательства процессы разупрочнения.

Однако наличие определенных тепловых условий для протекания процессов упрочнения является необходимым, но недостаточным условием. Как показывают экспериментальные данные на рис. 3.14 и 3.15, приработка на стали 45 в широком диапазоне температур (скоростей резания) практически не приводит к повышению стойкости инструмента, тогда как в этом же диапазоне температур приработка в условиях повышенных давлений (создаваемых резанием более прочных или упрочняемых материалов) значительно усиливает эффект упрочнения приработкой, обуславливая 4–6-кратное повышение стойкости. Следовательно, имеется нижний предел температур и давлений, когда значимость предварительной приработки в смысле повышения стойкости не представляет практического интереса. Такое положение проявляется до температуры Дебая, то есть температуры, выше которой возбуждены все колебания кристаллической решетки и, как следствие, облегчены процессы пластической деформации (для Fe температура Дебая равна 420 К).

По уровню давлений указанный предел, когда упрочнение практически не реализуется, соответствует условию обработки стали 45 при принятых режимах. По экспериментальным данным, отражающим, зависимость удельных нагрузок от твердости обрабатываемого материала (см. рис. 3.13), которые контролируют с эффектом приработки, полученным при обработке тех же материалов, этот уровень давлений в среднем составляет 500 МПа. При этих и меньших удельных нагрузках упрочнение охватывает, видимо, тонкие слои, либо вообще не реализуется. В любом случае, если оно даже есть, его роль в снижении износа практически не сказывается. Стимулировать же упрочнение за счет скорости не удастся, так как повышение температуры обуславливает протекание разупрочняющих процессов. Небольшой эффект, выраженный в наличии максимума при резании стали 45 (см. рис. 3.14, 3.15), практического интереса не представляет. Выше указанных давлений (500 МПа) упрочнение при обработке в диапазоне оптимальных температур (200...350°С) протекает тем интенсивнее, чем больше уровень контактных удельных нагрузок, и лимитирующим уровнем становится разрушение режущей кромки.

В работе [16] эти условия, уточненные ролью СОТС в упрочнении контактных слоёв инструмента, представлены схематически на рис. 3.19. Оптимальные тепловые условия упрочнения в этом случае соответствуют 200...400° С. В состоянии I вследствие относительно низких температур (до 200° С) деформационные процессы затруднены и исходная структура не претерпевает заметных изменений при износе – приращение твердости  $\Delta H_c = 0$ . В состоянии II упрочнения ( $\Delta H_c > 0$ ) реализуется последовательной цепью взаимосвязанных процессов: силовая и тепловая нагрузка контакта → пластическая деформация поверхностных (трущихся слоёв) → образование вторичных (упрочненных) структур → износ (усталостное разрушение исчерпавших запас пластичности фрагментов).

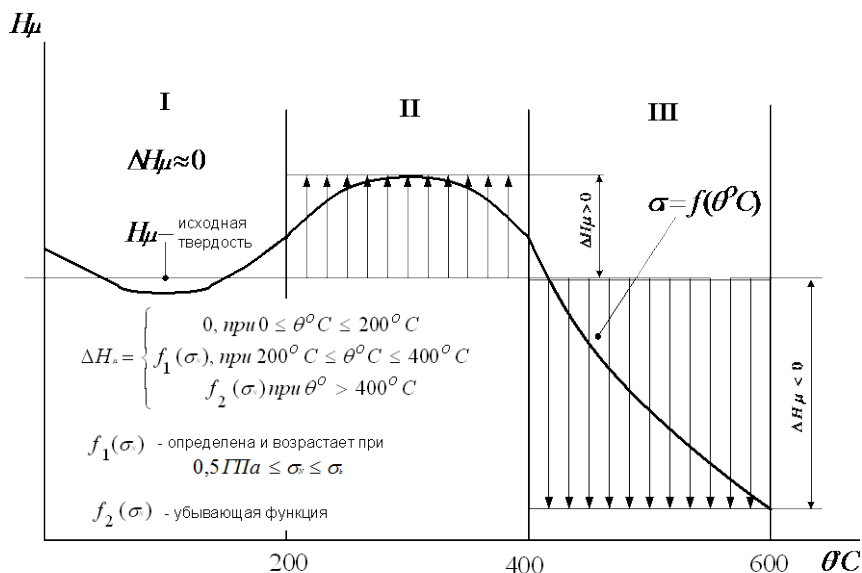


Рисунок 3.19 – Схема влияния температуры на трансформацию свойств контактных слоев инструмента из быстрорежущей стали

В состоянии III протекают процессы разупрочнения контактных слоев инструмента ( $\Delta H_{\mu} < 0$ ), стимулируемые повышенными (более  $400^{\circ} C$ ) значениями температур.

Таким образом, оптимальные условия приработки быстрорежущего инструмента соответствуют температурному диапазону в  $200...350^{\circ} C$  и ограничиваются в нижнем пределе уровнем давлений около  $500 \text{ МПа}$ , в верхнем – сопротивлением режущей кромки хрупкому разрушению. При этом в интервале указанных давлений эффект упрочнения тем выше, чем больше нормальные удельные нагрузки.

С учетом указанных условий и на основании большого количества опытных данных для решения оперативных задач сформулированы практические рекомендации по оптимизации процесса приработки.

При известной немонотонной стойкостной характеристике оптимальные режимы предварительной приработки можно принять соответствующими максимуму стойкости, наличие которого в [11] объяснено образованием вторичных износостойких структур.

Учитывая, что режимы предварительной приработки, обеспечивающие повышение стойкости инструмента, лежат в относительно широком диапазоне условий резания, оптимальную скорость приработки можно

определить исходя из условий при обработке конструкционных сталей как и резании труднообрабатываемых материалов:

$$V_{\pi} = (0,6 \dots 0,8)V_p, \quad (3.13)$$

$$V_{\pi} = (0,4 \dots 0,6)V_p, \quad (3.14)$$

где  $V_p$  – технологическая скорость резания;  $V_{\pi}$  – скорость предварительной приработки.

Учитывая, что формирование наиболее износостойкой вторичной структуры приходится на диапазон температур 200...350°C, получено эмпирическое уравнение для расчета оптимальной скорости предварительной приработки модульных червячных фрез при обработке зубчатых колес из конструкционных сталей:

$$V_n = \frac{3,05 \cdot m^{0,68} \cdot z^{0,52}}{S^{0,8}}, \quad (3.15)$$

где  $m$  – модуль зубчатого зацепления;  $z$  – число зубьев;  $S$  – подача инструмента на один зуб фрезы.

Время предварительной приработки должно соответствовать периоду начального износа и, как показали эксперименты, в среднем составляет 5...10 мин.

Оптимизация режимов предварительной приработки путем варьирования скорости резания при постоянной площади сечения снимаемой стружки является в практическом плане наиболее легко реализуемой. Но в некоторых случаях предпочтительней может оказаться приработка на заниженных подачах, оптимальное значение которой следует определять из условия

$$S_n = (0,6 \dots 0,8)S_p, \quad (3.16)$$

где  $S_p$  – рабочая подача;  $S_n$  – подача при предварительной приработке.

При резании более твердых обрабатываемых материалов, чем конструкционные стали, возрастает степень упрочнения рабочих поверхностей инструмента, но при этом развивается более высокая температура резания, понижающая степень упрочнения вторичных структур. Поэтому скорость предварительной приработки необходимо снижать с повышением твердости обрабатываемого материала согласно формуле

$$V_n = 1,87 - 0,047 \cdot HRC_{обр}, \quad (3.17)$$

где  $HRC$  – твердость обрабатываемого материала.

Твердосплавный инструмент также упрочняется в определенных условиях резания (см рис. 3.11). Специально не останавливаясь на этом

вопросе, отметим, что упрочнение твердых сплавов по аналогии с быстрорежущей сталью имеет деформационную природу и связано с изменением тонкой структуры как связующей, так и карбидной фаз. Для сплава ВК8 оптимальные значения температур упрочнения (приработки) соответствуют диапазону 700° С...750° С.

### **3.4. Процесс резания с интегрированной кинематикой (на примере тангенциального течения)**

#### **3.4.1. Понятие о процессе резания с интегрированной кинематикой**

Современное машиностроение развивается по пути повышения гибкости производства и качества продукции. Решение проблемы построения малолюдной и энергосберегающей технологии, комплексной механизации, роботизации, автоматизации машиностроительного производства возможно только на базе эффективного использования физических и званием новых типов инструментов и с такими кинематическими характеристиками, которые бы обеспечивали многократное повышение производительности с учетом специфических особенностей реализации рабочего процесса. Поэтому в настоящее время особое внимание уделяется прогнозированию долговечности и качества продукции на каждом этапе ее производства и эксплуатации. Решение проблемы создания систем прогнозирования как самой продукции, так и процессов ее изготовления, особенно обработки резанием, играет немаловажную роль в сокращении времени выхода продукции на рынок и улучшении ее потребительских свойств.

Таким образом, одной из основных задач современной науки о резании материалов является создание систем надежного прогнозирования характеристик процессов, обеспечивающих повышение производительности обработки и качества изготавливаемой продукции. Известно [18], что для успешного решения этой глобальной проблемы необходимо иметь аналитическое описание соответствующего рабочего процесса, для чего требуется создание его универсальной и надежной математической модели.

Одной из особенностей моделирования процессов резания на современном этапе развития машиностроения является то, что при общей постановке задачи реализуется на этапе фундаментального моделирования разработка модели для каждого способа обработки в отдельности, что в значительной мере способствует разобщению усилий ученых и производственников в создании общих подходов к проблеме повышения эффективности использования современных информационных технологий, уже накопленного научного и практического опыта в различных областях механической обработки, созданных к настоящему времени баз данных.

Следует отметить, что проблема теоретического анализа процессов резания для большинства формообразующих методов уже изучена достаточно подробно [19]. В то же время существуют виды обработки (особенно

труднообрабатываемых материалов, области использования которых постоянно расширяются). В то же время методы такого анализа требуют либо совершенствования, либо пока вообще отсутствуют. Такое состояние вопроса наиболее характерно для нестационарных процессов, например, таких как: точение прерывистых поверхностей, фрезерование, шлифование, тангенциальное точение (ТТ) и т.п. Это вызвано, в первую очередь, трудностями разработки и решения достаточно сложной математической модели, реализация которой требует выполнения значительного объема вычислений. Основной проблемой является учет всех особенностей процесса резания принятой математической моделью и корректное формулирование граничных условий, в полной мере отражающих явления, свойственные только рассматриваемому конкретному реальному процессу резания. Одной из главных предпосылок успешного решения проблемы создания обобщенной аналитической модели для любых ПР, в т.ч. и квазистационарных, являющихся в той или иной мере их частными случаями, может быть использование для этих целей процесса резания с интегрированной кинематикой, т.е. такого процесса обработки резанием, которые бы были способны интегрироваться в максимально возможное количество факторов делимые на три уровня (группы): технологическо-производственные, входные, внутренние параметры системы резания (рис. 3.20).

В общем случае большинство из них может изменяться во времени. Но даже изменение из всей совокупности хотя бы одного фактора, как правило, приводит к нестационарности всего процесса обработки, что существенно затрудняет как его анализ, так и управление процедурой поиска оптимальных условий его практической реализации. Поэтому для успешного решения поставленной задачи, заключающейся в разработке более достоверной и относительно менее громоздкой модели процесса резания, необходима систематизация всех факторов, определяющих как нестационарность процесса, так и его выходные параметры [20] (силы  $R$  и мощность  $W$  резания, качество обработанной поверхности  $Kч$ , точность формы и размеров  $Tч$ , производительность  $Пр$ , прочность  $Пн$  и стойкость  $Сн$  инструмента, экономические показатели  $Эк$  и др.). Большинство из них может изменяться во времени. Но даже изменение из всей совокупности хотя бы одного фактора, как правило, приводит к нестационарности всего процесса обработки, что существенно затрудняет как его анализ, так и управление процедурой поиска оптимальных условий его практической реализации. Поэтому для успешного решения поставленной задачи, заключающейся в разработке более достоверной и относительно менее громоздкой модели процесса резания, необходима систематизация всех факторов, определяющих как нестационарность процесса, так и его выходные параметры [20] (силы  $R$  и мощность  $W$  резания, качество обработанной поверхности  $Kч$ , точность формы и размеров  $Tч$ , производительность  $Пр$ , прочность  $Пн$  и стойкость  $Сн$  инструмента, экономические показатели  $Эк$  и др.).

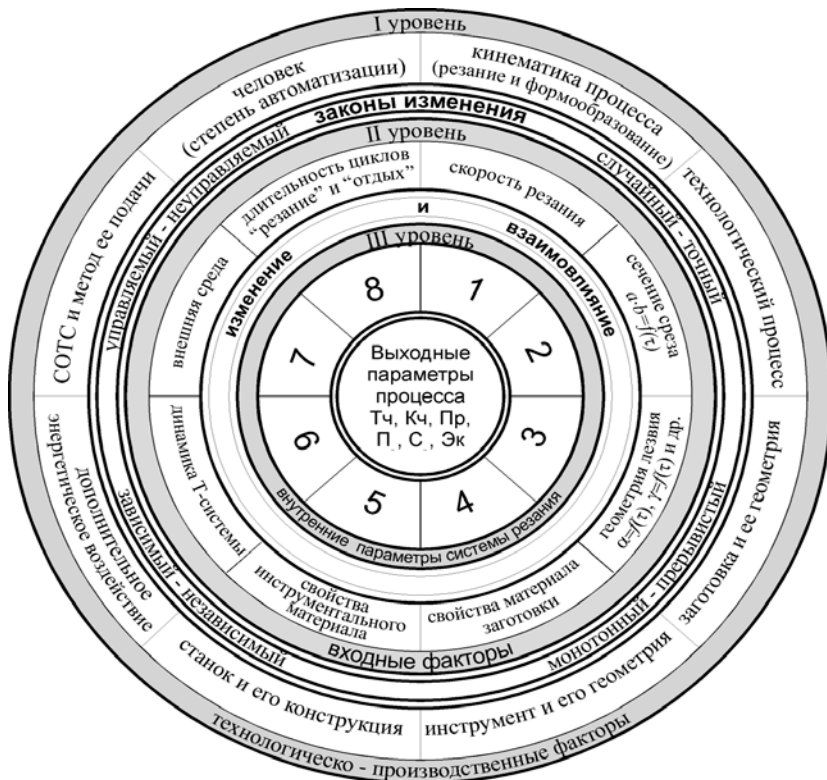


Рисунок 3.20 – Классификация факторов, определяющих нестационарность процесса резания

Успешная разработка универсальной прогнозирующей модели процесса резания возможна только при комплексном подходе к процессу формообразования, обеспечивающем возможность оптимизации с помощью ЭВМ условий работы лезвия инструмента, абстрагируясь как от конкретного инструмента (типа, конструкции, размера и т.п.), так и от конкретного способа обработки (точение, сверление, фрезерование и др.) путем задания условий рационального нагружения лезвия инструмента, которые можно задавать еще на стадии его проектирования (рис. 3.21) в зависимости от: свойств обрабатываемого материала и желаемых (выбираемых); инструментального материала (быстрорежущая сталь, твердый сплав и др.); процесса формообразования (диапазоны скоростей резания, подачи и т.п.); геометрии срезаемого слоя, определяющей время контакта; других условий (применение дополнительной энергии, вспомогательных материалов и др.).

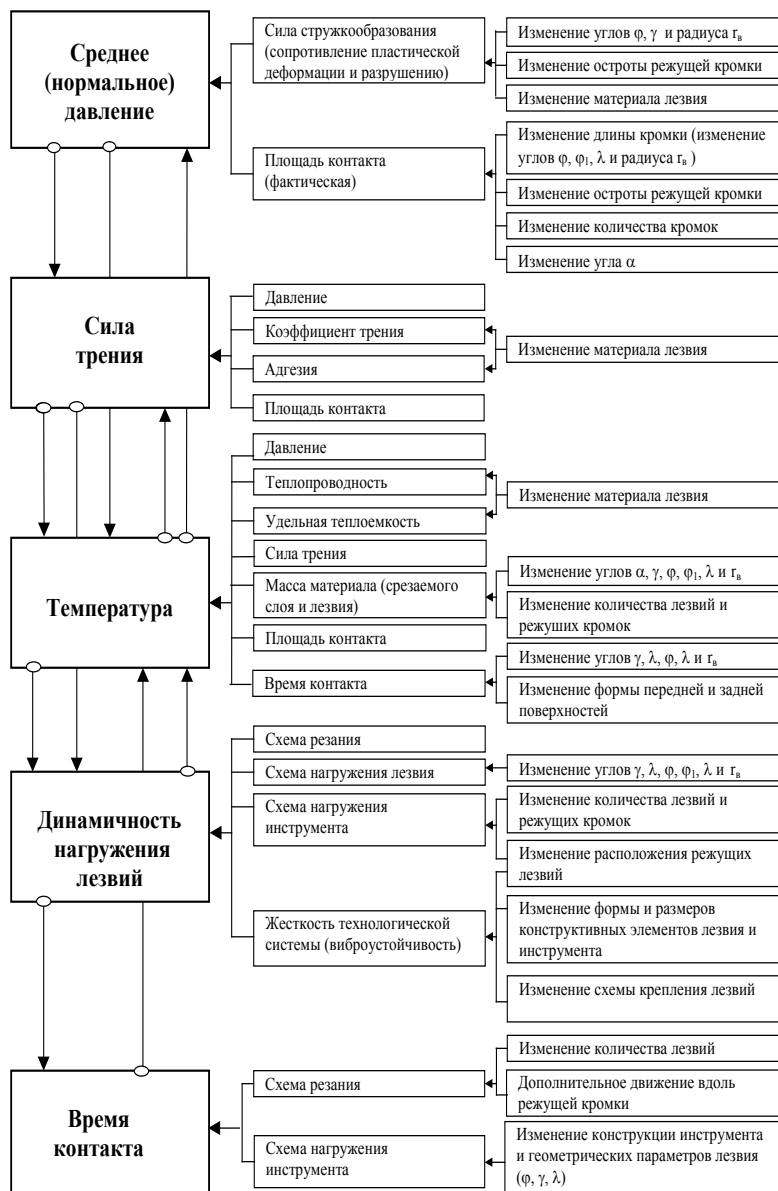


Рисунок 3.21 – Элементы и параметры регулирования режима нагружения лезвия и методы повышения ресурса инструмента на основе их интегрирования

При необходимости можно решать и обратную задачу: для заданных условий обработки выбрать оптимальный инструментальный материал, оптимальный состав покрытия, оптимальные условия дополнительного энергетического воздействия и др. Успешное решение как прямой, так и обратной задач оптимизации (на виртуальном уровне) для любого способа механической обработки с минимальными потерями времени и средств возможно при наличии относительно простой прогнозирующей обобщенной модели такого комплексного (базового) процесса, который бы имел (в комплексе) большинство отличительных признаков, главным образом определяющих нестационарность, характерных только для того или иного (рассматриваемого) вида обработки способного интегрировать перечисленные выше процессы и явления. Именно к таким процессам относится тангенциальное точение [21]. При тангенциальном точении с  $n=\text{const}$ ,  $S=\text{const}$ ,  $t(\Delta)=\text{const}$  (рис. 3.22) имеет место изменение во времени:

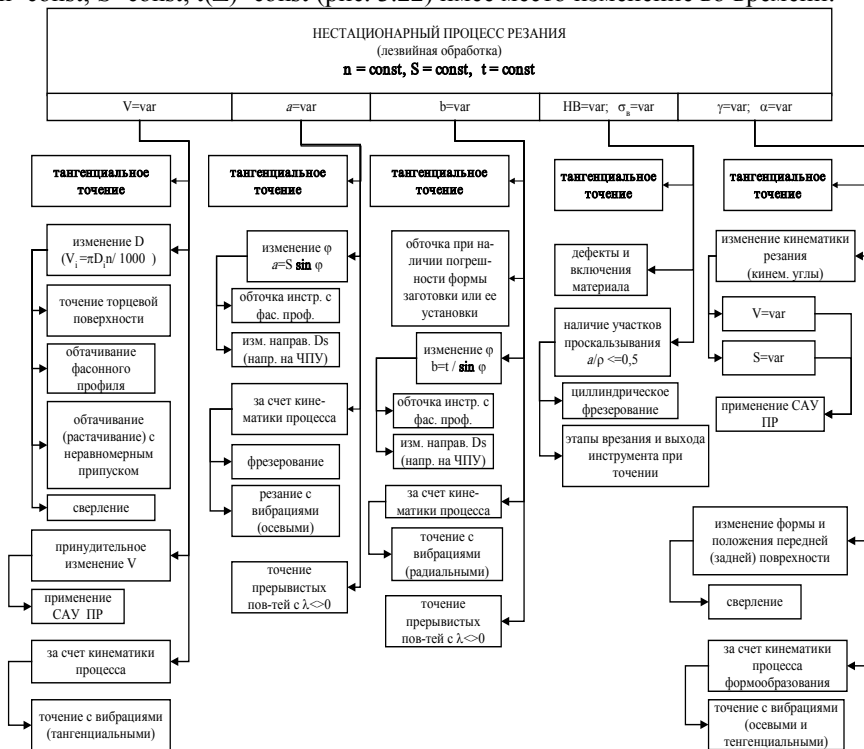


Рисунок 3.22 – Примеры практической реализации нестационарных процессов резания

скорости резания  $V$ , толщины  $a$  и ширины  $b$  (при  $\lambda \neq 0$ ) среза, твердости НВ и прочности  $\sigma_b$  материала срезаемого слоя, переднего  $\gamma$  и заднего  $\alpha$  углов лезвия, что обусловлено кинематикой процесса, изменение во времени.

Рассмотрение процесса обработки с позиций режима нагружения лезвий инструмента и интеграции ресурса отдельных процессов позволяет успешно реализовать на формализованном уровне комплексный подход (при наличии модели базового процесса резания) как в решении проблемы прогнозирования его работоспособности при заданных условиях, так и оптимизации этих условий в зависимости от требований к самой обработке (рис. 3.23).

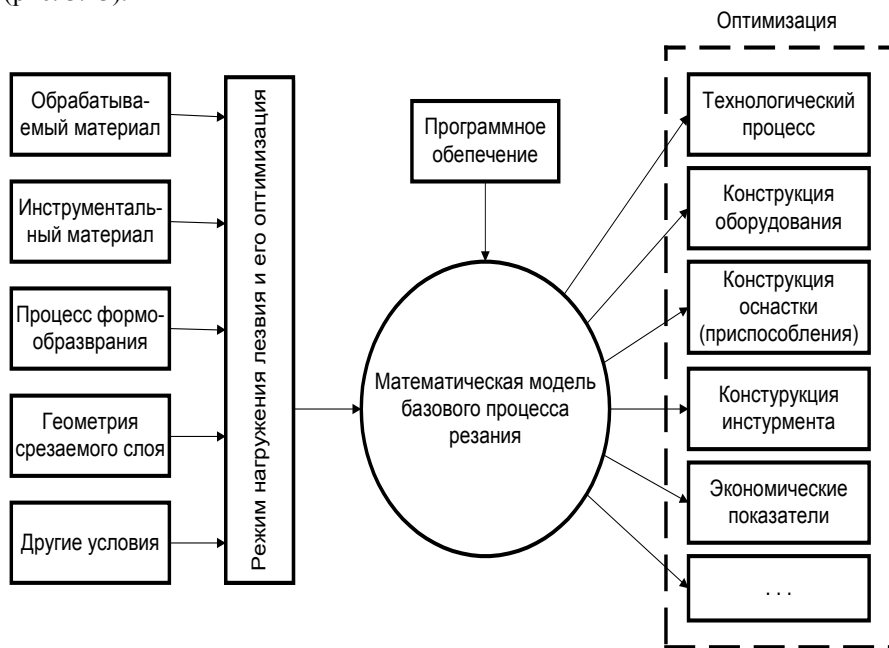


Рисунок 3.23 – Схема интегрированного процесса резания

Процесс **тангенциального точения**, обладающий достаточно широким набором признаков нестационарности, применим в качестве интегрированного (рис. 3.23) **базового процесса резания (БПР)**. Путем соответствующего изменения комплекса факторов, которые обуславливают нестационарность, можно модель БПР преобразовать в модель практического способа механической обработки (рис. 3.24) и оптимизировать его с учетом как условий (например, при резании труднообрабатываемых материалов) реализации того или иного пути совершенствования механической обработки, свойств обрабатываемого и инструментального

материалов, так и оптимального режима нагружения лезвий инструмента при этих условиях. При наличии модели базового процесса интегрированного резания возможна реализация принципиально нового подхода к проблеме моделирования. В этом случае этап фундаментального моделирования разбивается на два подэтапа: *этап 1.1-базовое моделирование; этап 1.2-функциональное моделирование* (рис. 3.25.)

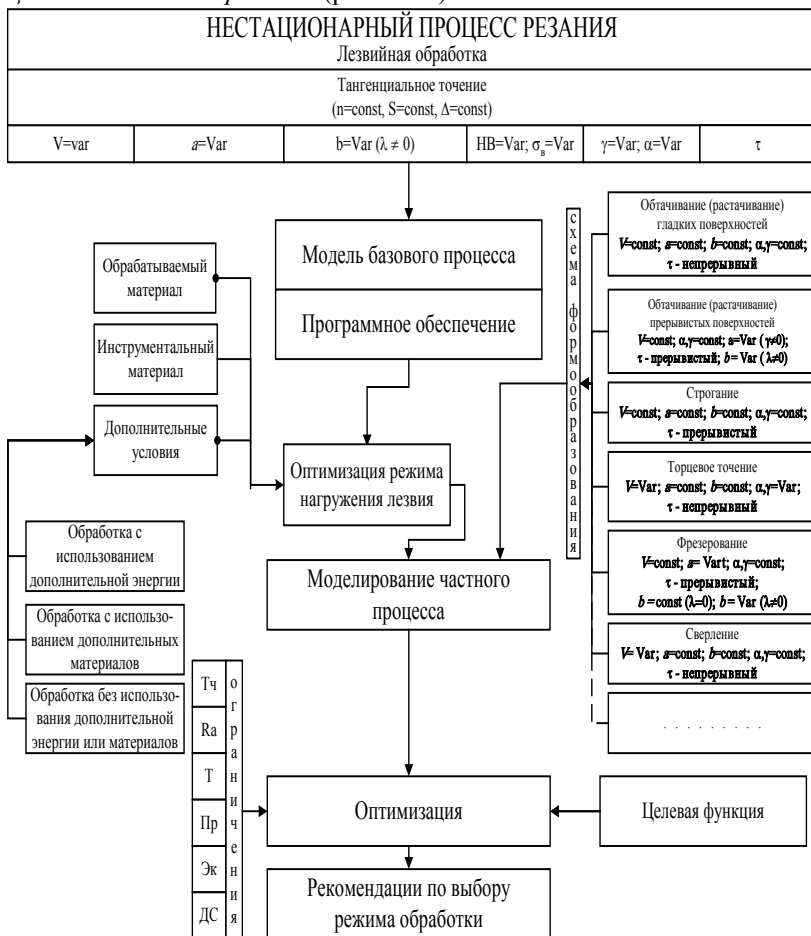


Рисунок 3.24 – Структурная схема моделирования и оптимизации частного процесса резания способная к интеграции

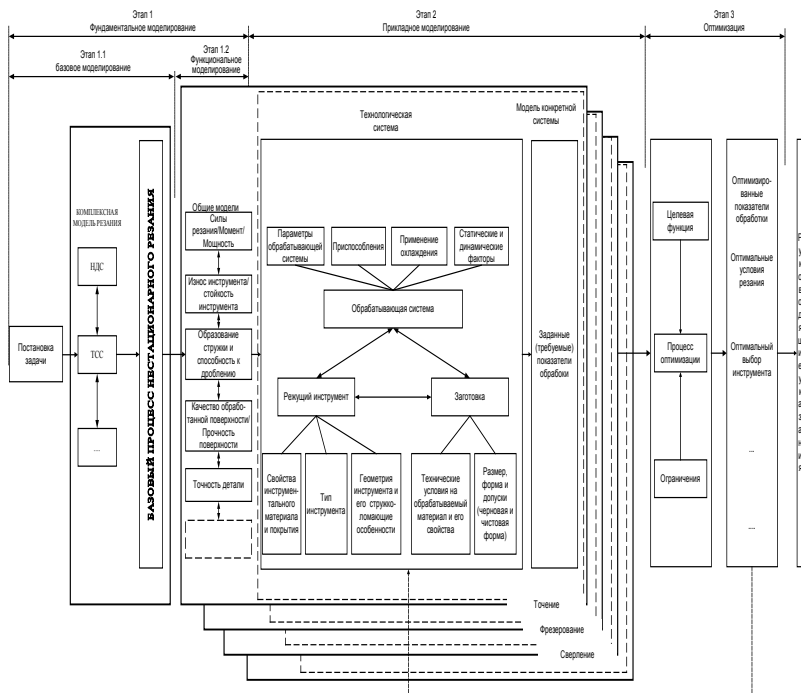


Рисунок 3.25 – Схема разработки прогнозирующих моделей процессов механической обработки с применением базового процесса нестационарного резания

При такой схеме на этапе 1.1 разрабатывается обобщенная модель нестационарного интегрированного процесса резания, принятого в качестве базового (например, тангенциального точения), оптимизируется режим нагружения лезвия и после экспериментальной проверки путем перехода от базового процесса (см. рис. 3.22), на виртуальном уровне создается модель соответствующего индивидуального процесса обработки (точения, сверления, фрезерования, шлифования и т.п.), каждый из которых характеризуется своей кинематикой. Таким образом, рассматриваемый для получения обобщенной (комплексной) модели базовый процесс нестационарного резания, в частности, тангенциальное точение, можно отнести к процессам с интегрированной кинематикой, т.е. включающей максимально возможное для принятого базового процесса резания ее разновидностей, которые могут быть характерны для того или иного частного вида обработки (точение, сверление, фрезерование, шлифование и др.) и в значительной мере определяемых его кинематикой.

При наличии модели базового процесса резания можно на

формализованном уровне как прогнозировать работоспособность лезвий инструмента, определяя на основе расчетов параметров напряженно-деформированного и теплового состояния системы резания уровень напряжений и соответствующий им запас прочности режущего клина, так и оптимизировать их режим нагружения (среднее нормальное давление, сила трения, температура, динамичность нагружения, время контакта) с учетом свойств обрабатываемого и инструментального материалов, условий (например, при резании труднообрабатываемых материалов) реализации того или иного пути совершенствования механической обработки (использование в зоне резания дополнительных видов энергии или материалов, изменение схем резания или формообразования и др. Следует обратить внимание на то, что реализация базового процесса (в данном случае тангенциального точения) в обрабатывающей системе непрерывного действия (роторный принцип) делает его сходным с другими видами нестационарного резания, в частности прерывистого (фрезерование, шлифование и др.), что позволяет рассматривать его в качестве **комплексного базового интегрированного способа нестационарной механической обработки (тангенциальное точение в сочетании с роторным принципом обработки)**, и на этой основе рассматривать все процессы, в том числе и с циклом «резание-отдых» как его частные случаи.

### **3.4.2. Общие сведения о процессе тангенциального точения**

Процесс тангенциального точения ТТ осуществляется при двух движениях: *главном*  $D_r$  – вращении заготовки с частотой  $n_o$ , определяющем скорость главного движения резания  $V$ , и *подачи*  $D_s$  – определяющем величину подач  $S$  и направление ее тангенциальной траектории, касательной к обработанной поверхности [21].

Особенностью процесса ТТ является такое соотношение величин скорости и подачи, которое не меньше отношения длины окружности обрабатываемой поверхности к длине контакта резца с деталью за цикл обработки  $\frac{V}{S} \geq \frac{\pi D}{l}$ , что и обуславливает возможность получения за оборот заготовки непрерывной стружки, т.е. осуществления именно процесса точения, а не, например, фрезерования.

Различают ТТ: с прямолинейной ( $a$ ) и круговой ( $\delta$ ) подачами по схемам как внешнего, так и внутреннего касания. Кроме того ТТ может быть встречным (направление подачи  $S$ ) или попутным (направление подачи  $S_n$ ) (рис. 3.26).

Если в момент выхода инструмента из контакта с заготовкой (точка  $B$ ) (рис. 3.27) направления векторов скоростей резания  $\bar{V}$  и подачи  $\bar{V}_s$  совпадают, то точение называется попутным, если эти векторы направлены в противоположные стороны – встречным.

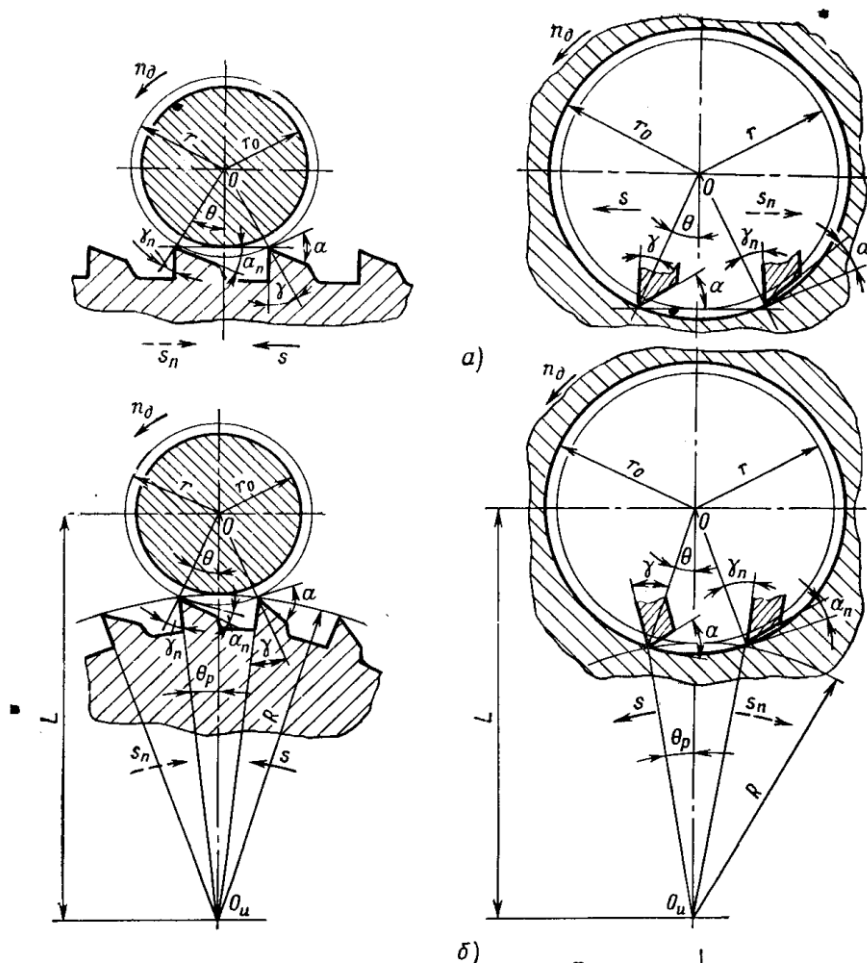


Рисунок 3.26 – Схемы тангенциального точения наружных и внутренних поверхностей с: прямолинейной (а) и круговой (б) подачами со встречным ( $S$ ) и попутным ( $S_n$ ) направлениями



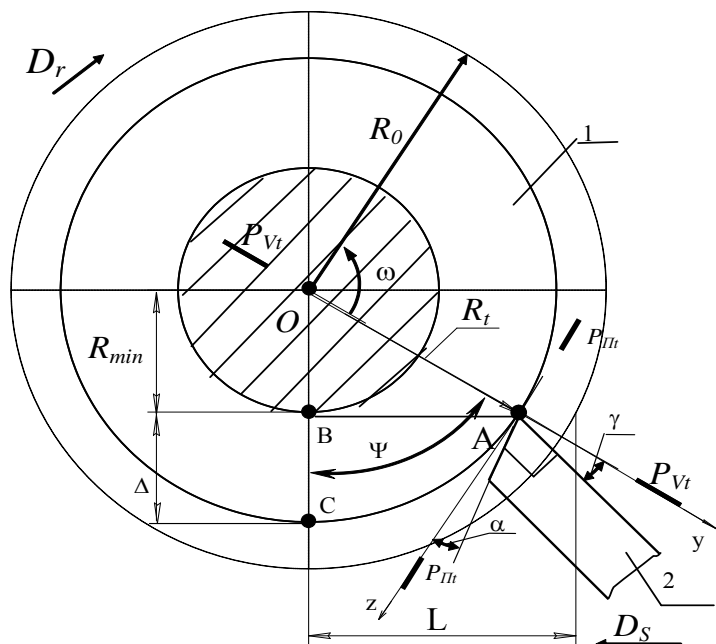


Рисунок 3.28 – Кинематическая схема процесса тангенциального точения с прямолинейной подачей: 1 – заготовка; 2- инструмент

В процессе резания траектория заданной точки режущей кромки представляет собой циклоидальную кривую, и поэтому толщина среза  $a(\varphi)$  теоретически определяется по формуле:

$$a(\omega) = R_t(\omega - 2\pi) - R_t(\omega), \quad (3.18)$$

где  $R_t(\omega) = \sqrt{R_{\min}^2 + \left(L - \frac{S_0\omega}{2\pi}\right)^2}$  – текущий радиус заготовки в точке А;

$R_0$  – радиус заготовки до обработки;  $R_{\min} = R_0 - \Delta$  – радиус заготовки после обработки;  $L = \sqrt{R_0^2 - R_{\min}^2}$  – путь пройденный вершиной лезвия за цикл обработки;  $\omega$  – угол, соответствующий повороту мгновенной основной плоскости  $P_{Vt}$  за время контакта инструмента с заготовкой;  $S_0$  – тангенциальная подача, мм/об.

Условно принято, что при  $\omega < 0$   $R_t = R_0$ .

В формуле (3.18) в качестве аргумента принят угол поворота  $\omega$

мгновенной основной плоскости. Однако часто для анализа зависимостей удобно использовать текущий оборот заготовки  $n_t$ . Тогда связь между  $\varphi$  и  $n_t$  определяется выражением:

$$n_t = \frac{\omega - \omega_{nonp}}{2\pi}, \quad (3.19)$$

где  $\omega_{nonp}$  - поправочный коэффициент по формуле:

$$\omega_{nonp} = \arccos \frac{R_t(\omega - 2\pi)^2 + R_t(\omega)^2 - S_0^2}{2R_t(\omega - 2\pi)R_t(\omega)}. \quad (3.20)$$

Часто поправкой  $\omega_{nonp}$  можно пренебречь. В этом случае формула (3.19) примет вид:

$$n_t = \frac{\omega}{2\pi}, \quad (3.21)$$

С другой стороны, в работе [7] предложено толщину среза при  $\omega \geq 2\pi$  определять по формуле:

$$a(\omega) \approx S_0 \sin(\Psi(\omega)), \quad (3.22)$$

где  $\Psi(\omega) = \arccos \frac{R_{\min}}{R_t(\omega)}$  - угол трансформации.

Количество оборотов, необходимое для снятия всего припуска, равно:

$$n_c = \frac{L}{S_0}. \quad (3.23)$$

При этом время обработки составляет:

$$\tau = \frac{n_c}{n}, \quad (3.24)$$

где  $n$  – частота вращения заготовки.

Изменение толщины среза за цикл обработки, вычисленное по формуле (3.18) графически представлено на рисунке 3.29 (кривая 1). При этом максимальная толщина среза достигается в конце первого оборота заготовки ( $\omega_{\max} = 2\pi$ ) и рассчитывается по формуле:

$$a_{\max} = a(2\pi) = R_0 - \sqrt{R_{\min}^2 + (L - S_0)^2} \quad (3.25)$$

Однако сравнение кривой 1 с радиусом округления режущей кромки лезвия (для твердых сплавов  $\rho \approx 40$  мкм) позволяет сделать вывод о том [22, 23, 25], что закон изменения толщины среза должен иметь вид кривой 2

(рис. 3.29), поскольку образование стружки начинается при условии  $a/\rho \approx 0.5$ . В соответствии с этими представлениями часть цикла «резание» может быть условно разбита на 6 участков (рис. 3.29, 3.30):

- участок I – полное отсутствие резания. На данном участке происходит трение между инструментом, подходящим к обрабатываемой заготовке со стороны задней поверхности, и обрабатываемой поверхностью;

- участок II – отсутствие резания и интенсивное пластическое деформирование поверхностного слоя заготовки;

- участок III и IV – происходит процесс резания; стружка сходит по передней поверхности в направлении, нормальном к режущей кромке, и завивается в виде плоской спирали. С уменьшением толщины среза стружка также становится меньше;

- участок V и VI – процессы на этих участках аналогичны процессам на участках II и I соответственно.

Однако установлено [25], что форма кривой действительного закона изменения толщины среза имеет вид кривой 3 (рис. 3.29). Искажение формы кривой вызвано силовым взаимодействием режущего инструмента и заготовки при конечной жесткости элементов технологической системы, что приводит к отжатию инструмента (рис. 3.31) и, соответственно, к изменению толщины среза.

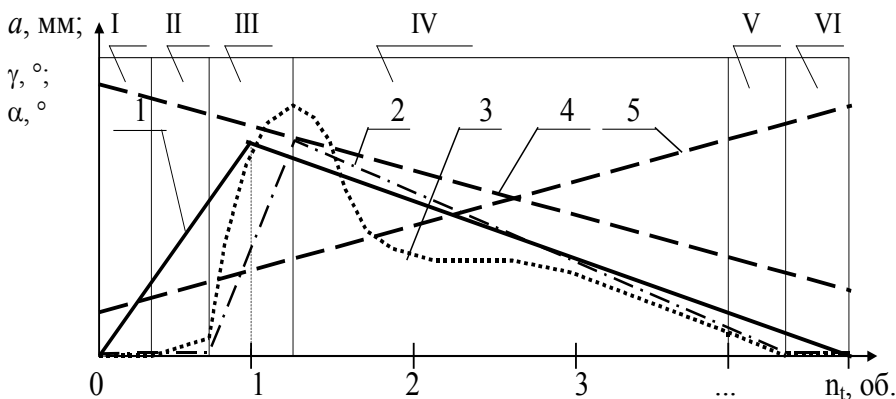


Рисунок 3.29 – Диаграммы изменения кинематических параметров резания в течение цикла обработки: кривая 1 – теоретический закон изменения толщины среза; кривая 2 – закон изменения толщины среза; 3 – действительный закон изменения толщины среза; 4, 5 – законы изменения кинематических углов (переднего  $\gamma$  и заднего  $\alpha$ )

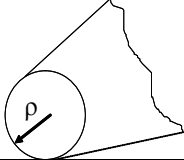
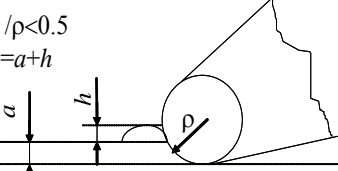
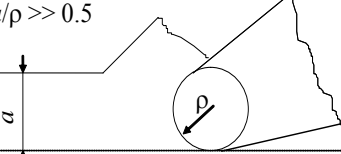
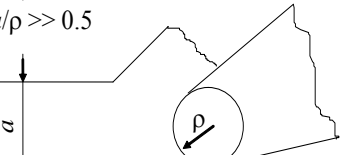
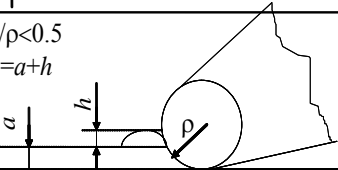
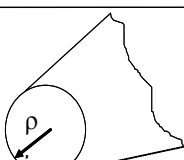
<p><b>1 участок</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- отсутствие резания;</li> <li>- интенсивное трение.</li> </ul>	<p><math>a/\rho \ll 0.5</math></p> 
<p><b>2 участок</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- отсутствие резания;</li> <li>- интенсивное трение;</li> <li>- упрочнение срезаемого слоя;</li> <li>- наличие характерного валика.</li> </ul>	<p><math>a_{\Sigma}/\rho &lt; 0.5</math> <math>a_{\Sigma} = a + h</math></p> 
<p><b>3 участок</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- резание;</li> <li>- толщина среза увеличивается.</li> </ul>	<p><math>a/\rho \gg 0.5</math></p> 
<p><b>4 участок</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- резание;</li> <li>- толщина среза уменьшается.</li> </ul>	<p><math>a/\rho \gg 0.5</math></p> 
<p><b>5 участок</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- отсутствие резания;</li> <li>- интенсивное трение;</li> <li>- упрочнение срезаемого слоя;</li> <li>- наличие характерного валика.</li> </ul>	<p><math>a_{\Sigma}/\rho &lt; 0.5</math> <math>a_{\Sigma} = a + h</math></p> 
<p><b>6 участок</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- отсутствие резания;</li> <li>- интенсивное трение.</li> </ul>	<p><math>a/\rho \ll 0.5</math></p> 

Рисунок 3.30 – Особенности ПТТ на различных участках цикла обработки на лезвие действует сила нормального давления  $N$  и сила трения  $F$ .

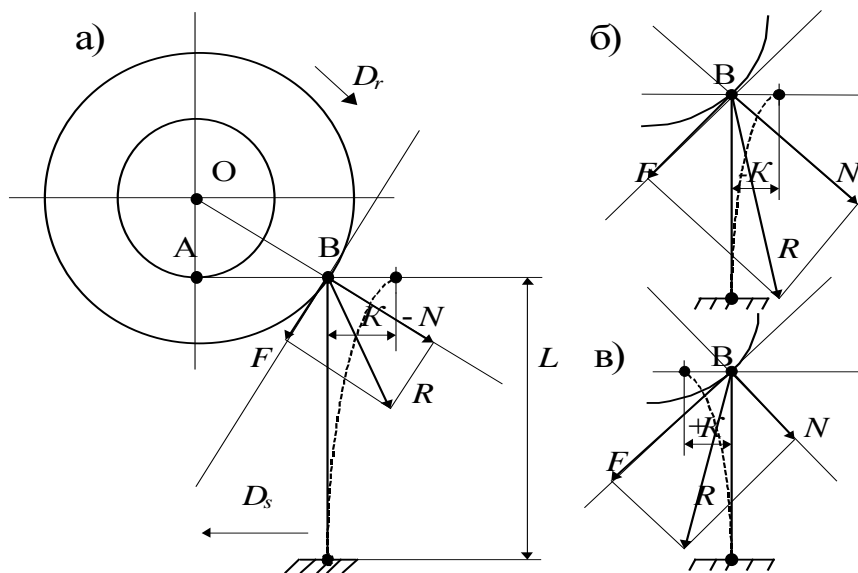


Рисунок 3.31 – Силовое взаимодействие инструмента с заготовкой на участке 1

Таким образом, без принудительного введения в зону резания дополнительных режущих элементов со свойственными им кинематическими характеристиками их влиянием на процессы, протекающие у кромок и поверхностей режущих клиньев, консолидируется, интегрируя общий потенциал и обеспечивая новый уровень выходных показателей резания, в данном случае, тангенциального.

Если резец представить в виде закрепленной одним концом консоли длиной  $L$  и движущейся со скоростью подачи  $V_s$  (рис. 3.31,а), то после начала контакта инструмента с заготовкой Соотношение этих двух составляющих определяет величину и направление результирующей силы  $R$ , которая и вызывает упругое перемещение вершины режущего клина на величину  $K$ . В первые моменты после начала контакта инструмента с заготовкой  $N$  больше  $F$  и вершина лезвия отклоняется на величину  $K$  в сторону, противоположную направлению подачи (рис. 3.31,б). При дальнейшем движении инструмента соотношение между силами  $N$  и  $F$  изменяется и к концу участка 1 вершина лезвия перемещается в исходное положение (рис. 3.31,в). Описанное силовое взаимодействие является одной из основных причин отсутствия резания на

участке 1 в начале цикла, приводящей к увеличению доли времени проскальзывания в цикле обработки.

Участок 2 также отличается отсутствием резания, интенсивным трением и упрочнением срезаемого слоя вследствие неблагоприятного соотношения  $a/\rho$  для образования стружки (рис. 3.30). Характерным для данного участка является то, что перед режущим клином образуется «валик», постоянно увеличивающийся и волнообразно перемещающийся по мере движения лезвия и приводящий к изменению соотношения  $a/\rho$  за счет увеличения действительной толщины среза. В какой-то момент времени при увеличении толщины среза это соотношение становится благоприятным для образования стружки (участок 3). Таким образом, величина участка 2 определяется временем, в течение которого суммарная величина толщины среза и движущегося перед режущим клином валика  $a_{\Sigma}$  не станет, как известно, больше величины, примерно равной  $0,5\rho$ . На данном участке, в результате роста сил, действующих на резец, происходит дальнейшее увеличение его прогиба и, следовательно, перемещение вершины лезвия в направлении, противоположном подаче.

Участки 3 и 4 характеризуются наличием стружки, так как соотношение  $a/\rho$  в течение этих участков больше 0.5. На участке 3 происходит увеличение толщины среза от нуля до максимального значения. Резкое увеличение величины  $K$  под действием возрастающих сил резания приводит к увеличению скорости подачи, а соответственно и превышению толщины среза над расчетными (теоретическими) значениями. В конце этого участка  $a_{д.маx} > a_{т.маx}$ . На участке 4 происходит срезание основной части припуска. В течение этого участка  $K$  уменьшается, так как снижаются действующие силы резания. Характерным является то, что часть припуска, подлежащего срезанию, уже удалена на предыдущем участке (за счет увеличения прогиба инструмента на величину  $K$ ). Поэтому на кривой 2 (рис. 3.29) в начале участка 4 наблюдается характерный «провал», где значения действительной толщины среза меньше расчетных.

Процессы, происходящие на участках 5 и 6, аналогичны тем, которые имеют место на участках 2 и 1 соответственно. Наличие участков проскальзывания может вызвать (при недостаточной жесткости элементов обрабатываемой системы) возникновение вибраций. Величина  $K$  уменьшается до 0 к концу участка 6.

Как следует из рис. 3.29, фактический максимум толщины среза смещен вправо из-за наличия участков проскальзывания и его величина превышает

Установлено [23], что при попутном тангенциальном точении доля участков проскальзывания в зависимости от условий обработки может превышать 20% (рис. 3.32).

Условия обработки			Соотношение этапов в цикле обработки	
п, об/мин	S, мм/об	Δ, мм	Соотношение «резание - проскальзывание»	Соотношение проскальзывания в начале и конце цикла
1600	1,5	1,5		
1600	1,5	0,5		
1600	0,5	0,5		

Рисунок 3.32 – Удельный вес проскальзывания за цикл обработки, в начале и конце цикла в зависимости от режима тангенциального точения

■ резание; проскальзывание в начале □ и в конце ■ цикла

Кинематические передний  $\gamma(\varphi)$  и задний  $\alpha(\varphi)$  углы в течение цикла резания рассчитываются по формулам:

$$\gamma(\omega) = \psi(\omega) - \gamma_c, \quad \alpha(\omega) = \psi(\omega) + \alpha_c, \quad (3.26)$$

где  $\gamma_c, \alpha_c$  – соответственно, статические передний и задний углы.

Как видно из формулы (3.26), для попутного тангенциального точения характерно уменьшение кинематического переднего угла и увеличение кинематического заднего угла (кривые 4 и 5, рисунок 3.29). В начале цикла обработки, когда толщина среза достигает максимальных значений, большой

передний угол уменьшает динамическую силу резания, что оказывает положительное влияние на технологические параметры процесса.

*Совместное действие переменной толщины среза и изменяющихся углов резания проявляется в изменении углового положения и границ зоны пластических деформаций, влияющей на силовые и тепловые характеристики процесса, наростообразование и др.*

Таким образом, эти параметры играют важную роль в интеграции важнейших механо-физико-химических процессов на контактных поверхностях инструмента, стружки и обрабатываемого материала.

Рассмотрим это явление на примере тангенциального точения с прямолинейной подачей, зафиксировав центральную часть зоны пластических деформаций углом сдвига  $\Phi$ . При врезании резца со встречной подачей в точке А (рис. 3.33), когда толщина среза наибольшая  $a_{max}$ , а передний угол  $\gamma$  наименьший, положение зоны пластических деформаций определяется углом  $\Phi_1$ .

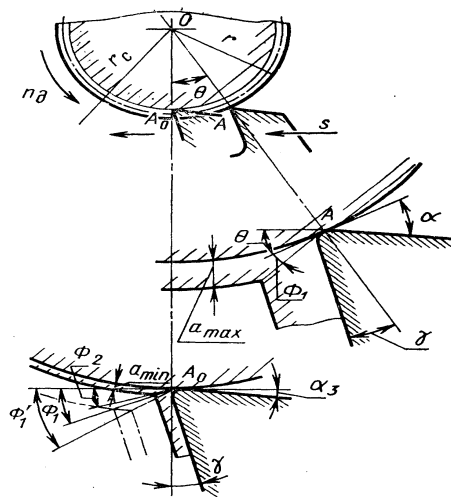


Рисунок 3.33 – Изменение положения поверхности сдвига

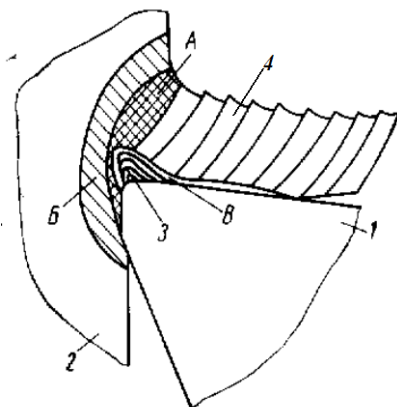


Рисунок 3.34 – Схема зоны стружкообразования при резании материалов: 1 – инструмент; 2 – заготовка; 3 – нарост; 4 – стружка

Если бы толщина среза оставалась неизменной (см. штриховую линию), то вследствие роста  $\gamma$  угол сдвига к концу резания увеличился бы до значения  $\Phi'_1$ . С другой стороны, при постоянном переднем угле уменьшение толщины среза приводит к уменьшению угла сдвига. В итоге в конце резания (точка  $A_0$ ) при толщине среза, равной  $a_{min}$ , положение плоскости сдвига определяется углом  $\Phi_2$ .

ТТ с попутной подачей сопровождается более быстрым, по сравнению с другими видами ТТ, уменьшением угла сдвига по мере уменьшения толщины среза, что вызвано, в отличие от встречного точения, уменьшением переднего угла.

С технологической точки зрения наиболее целесообразно заканчивать обработку с убыванием толщины среза, так как вместе с ней уменьшается отжатие системы, а, следовательно, повышается точность формообразования. Однако с уменьшением толщины среза уменьшается угол сдвига  $\Phi$ , что приводит к существенному увеличению удельной силы резания. Для компенсации влияния убывающей толщины среза к концу обработки на уменьшение угла сдвига необходимо увеличить передний угол.

### **3.4.3. Физические явления, сопровождающие процесс интегрированного резания**

Механика процесса стружкообразования при ТТ соответствует общим представлениям о механике стружкообразования при резании металлов, которые кратко охарактеризованы схемой, приведенной на рис. 3.34. Известно [28], что процесс превращения срезаемого слоя в стружку в общем случае представляет собой процесс направленного разрушения материала заготовки лезвием путем создания напряженно-деформированного состояния в срезаемом слое и заготовке, сопровождающегося упругими и пластическими деформациями, образования трещин и последующего разрушения, которое в зависимости от состояния материала при условиях обработки может быть либо вязким, либо хрупким [29, 30]. При этом лезвие непосредственно контактирует со срезаемым слоем, стружкой и заготовкой, что приводит к возникновению контактных процессов на его поверхностях, а в области, расположенной у режущей кромки, застойной зоны, которая при определенных условиях может преобразоваться в нарост [28, 29, 30, 31, 32 и др.].

Важным параметром, характеризующим процесс тангенциального резания, является динамика силового взаимодействия. На рис. 3.35 приведены диаграммы изменения сил резания  $P_z$  и  $P_y$  (кривые 1 и 2) при свободном ТТ [35]. Эти экспериментально полученные зависимости могут быть описаны эмпирическими формулами:

$$P_z(n_t) = \sum_{k=0}^m x_k^z n_t^k, \quad P_y(n_t) = \sum_{k=0}^m x_k^y n_t^k, \quad (3.27)$$

где  $x_k^z$ ,  $x_k^y$  – коэффициенты;  $m$  – степень интерполяционного полинома.

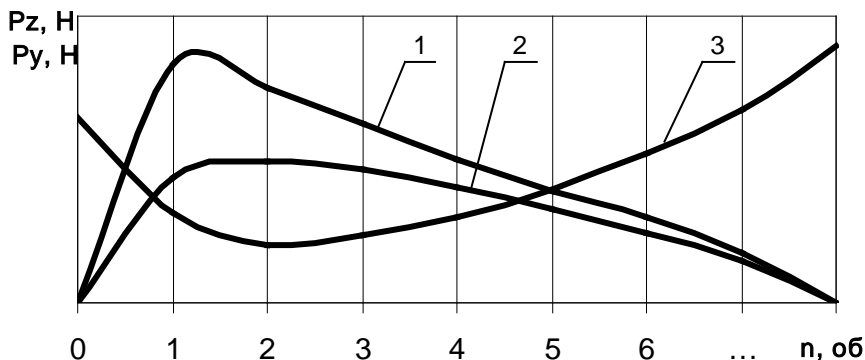


Рисунок 3.35 – Графики изменения сил резания  $P_z$  (1),  $P_y$  (2) и коэффициента укорочения стружки  $\xi$  (3)

Анализ осциллограмм показывает, что на участках проскальзывания, где нет контакта стружки с передней поверхностью, существуют силы  $F_{mz}$  и  $N_z$ , которые можно принять соответственно за силу трения и нормальную силу, действующую на площадке контакта задней поверхности инструмента и заготовки. Поэтому силы на передней поверхности лезвия вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned} F_{mn} &= P_{z0} \sin \gamma + P_{y0} \cos \gamma \\ N_n &= P_{z0} \cos \gamma - P_{y0} \sin \gamma \end{aligned} \quad (3.28)$$

где  $P_{z0} = P_z - F_{mz}$ ;  $P_{y0} = P_y - N_z$ .

Кроме того важной характеристикой процесса резания является коэффициент укорочения стружки  $\xi$ . На рис. 3.35 (кривая 3) приведен график характерного изменения  $\xi$  в течение цикла обработки [23] и может быть описан эмпирическая зависимостью в виде:

$$\xi(n_t) = \sum_{k=0}^m x_k \xi n_t^k \quad (3.29)$$

Таким образом, вышеописанные особенности процесса ТТ делают его сходным с другими нестационарными процессами, как, например, фрезерование и шлифование. Сходство наблюдается в режиме работы инструмента, изменении параметров системы резания, времени контакта. В таблице 3.2 дано сравнение процессов цилиндрического фрезерования и круглого шлифования с процессом попутного ТТ с прямолинейной подачей.

Таблица 3.2 – Сравнение процесса ТТ с процессами фрезерования и шлифования

Явление	Попугное тангенциальное точение	Цилиндрическое фрезерование	Круглое шлифование
Режим работы лезвия	Цикл резание-отдых	Цикл резание-отдых	Цикл резание-отдых
Длительность цикла	$> 1с$	$< 0.1 с.$	$\ll 0.1 с$
Отношение длительности цикла отдыха к длительности цикла резания	$> 2$ – определяется временем холостых ходов	$\gg 2$ – определяется количеством режущих лезвий фрезы	$\gg 10$ – определяется диаметром шлифовального круга
Количество циклов для снятия всего припуска	1	$>1$	$\gg 100$
Закон изменения толщины среза	Экстремальный	Монотонный	Экстремальный
Максимальная толщина среза	0.1 – 0.4 мм	0.1-0.3 мм	$\ll 0.1 мм$
Изменение кинематических углов	Изменяются	Не изменяются	Не изменяются
Проскальзывание	Значительная часть	Незначительная	Значительная часть
Инструментальный материал	БРС или ТС	БРС или ТС	АМ, алмаз, КНБ
Соотношение теплопроводностей инструментального и обрабатываемого материала при обработке сталей	Около 2	Около 2	До 20 – для алмаза До 1 – абразивные материалы
Наибольший тепловой поток	В стружку и заготовку	В стружку и заготовку	В заготовку

Во всех этих процессах режущее лезвие работает по циклу резание-отдых. Однако длительность этого цикла для каждого из описанных процессов различна. Для фрезерования и шлифования она определяется, главным образом, конструкцией инструмента и скоростью резания, поскольку

режущее лезвие участвует в снятии припуска несколько раз. В тоже время при ТТ этот период в основном определяется временем между обработкой заготовок, заданным конструкцией станка и ТП.

Во всех рассматриваемых процессах толщина среза является переменной в течение части цикла резание. Однако при фрезеровании толщина среза изменяется монотонно от нуля до максимума или от максимума до нуля при величине максимальной толщины среза, сравнимой с величиной максимальной толщины среза при ТТ. В тоже время, при круглом шлифовании закон изменения толщины среза аналогичен закону изменения толщины среза при ТТ, однако максимальная толщина среза, как правило, значительно меньше ее величины при ТТ.

Таким образом, учитывая особенности закона изменения толщины среза при ТТ (малая в начале и конце цикла обработки и большая в середине) можно говорить, что этот процесс сходен с процессом шлифования в начале и конце части цикла «резание» и с процессом фрезерования – в середине цикла.

Действительно микрорезанию при шлифовании, также, как и в начале части цикла «резание» при ТТ, свойственно наличие проскальзывания с большим удельным весом в цикле обработки. Однако это явление в значительно меньшей степени характерно для процесса фрезерования.

Важно отметить, что из всех рассматриваемых процессов только при попутном ТТ с прямолинейной подачей значительно изменяются кинематические углы лезвия.

С точки зрения характера протекания тепловых процессов наиболее близким к процессу ТТ является процесс фрезерования, при котором применяются те же инструментальные материалы, что и при ТТ; аналогично протекают процессы стружкообразования и износа. В то же время процесс ТТ существенно отличается от процесса шлифования, где теплопроводность инструментального материала меньше теплопроводности обрабатываемого материала при абразивном шлифовании или значительно больше при алмазном шлифовании, в то время как при ТТ эти величины примерно равны. Для всех описываемых процессов характерно наличие значительного оттока теплоты в заготовку. Однако наибольшая его величина наблюдается именно при шлифовании и в начале цикла обработки при ТТ.

Для изучения процессов ТТ, наиболее склонных к интеграции, может быть применен математический аппарат, разработанный для процессов фрезерования и шлифования с учетом различий между указанными процессами. В процессе резания происходит большое количество различных явлений: пластические и упругие деформации, внешнее трение, тепловые явления, абразивный, диффузионный и химический износ, упрочнение и разупрочнение и т.д. Все эти явления в той или иной степени влияют друг на друга. Однако важнейшую роль среди них играют пластические деформации обрабатываемого материала, так как они в значительной степени

предопределяют протекание всех остальных явлений и, следовательно, процесса резания в целом. От величины, направления и степени сопротивления пластической деформации зависит нагрузка на упругую систему «станок-приспособление-инструмент-заготовка», работа резания и ее составляющие, контактные напряжения на рабочих поверхностях режущего инструмента, общее количество выделяющегося тепла, интенсивность износа и т.д.

Специфические особенности кинематики и динамики процесса ТТ значительно сказываются на характере тепловых явлений. Из проведенных экспериментов по точению стальных колец инструментом из твердого сплава методом попутного тангенциального точения [36] известно, что деталь в процессе обработки практически не изменяет своей средней температуры, в то время как температура стружки и контактных площадок инструмента значительна.

В ходе экспериментов было доказано, что применение СОТС нежелательно для процесса скоростного ТТ, так как вызывает значительное снижение стойкости инструмента из-за интенсивного разрушения поверхностного слоя на передней поверхности, что свидетельствует о наличии большого градиента температур на рабочих поверхностях лезвия инструмента и, как следствие, значительных термических напряжений в режущей части инструмента (РЧИ). При циклическом действии эти явления приводят к появлению трещин и ее разрушению. На рис. 3.36 представлена фотография РК твердосплавной пластины (Т15К6), имеющей характерный скол, наблюдавшийся после тангенциального точения деталей из ШХ15 с охлаждением эмульсией.



Рисунок 3.36 – Характерное разрушение твердосплавной (Т15К6) пластины в условиях ТТ

#### **3.4.4. Теоретические предпосылки сухого резания при тангенциальном точении инструментами из твердых сплавов**

При высокопроизводительной обработке металлов резанием, в том числе и при ТТ, в промышленности широко применяется твердосплавный инструмент групп ВК, ТК, ТТК. Разрушение РЧИ под действием нагрузок,

определяемых как силами резания, так и тепловым состоянием системы, исходя из возникшего в ней напряженного состояния, характеризуется следующими показателями прочности:  $\sigma_b$ ,  $\sigma_{-b}$ ,  $\sigma_{0,01}$  и др. В настоящее время хорошо известно, что все эти характеристики материала сильно зависят от температуры, что несомненно должно учитываться при анализе прочности РЧИ.

По современным представлениям макроскопическое разрушение является результатом постепенного развития и накопления микротрещин, которые с увеличением внешней нагрузки сливаются в макротрещину. Процесс зарождения и развития трещин зависит от продолжительности приложения нагружения [29].

При недостаточной прочности РЧИ ее разрушение происходит путем хрупкого скалывания и выкрашивания или в результате пластической деформации и последующего среза.

При обработке инструментом с твердосплавными неперетачиваемыми пластинами довольно часто на практике встречается выкрашивание РЧИ, проявляющееся в отделении малых частиц режущей кромки. Это вид разрушения связан с поверхностными дефектами инструментального материала, неоднородностью структуры, остаточными напряжениями и т. д. Однако при переходных процессах обработки основной причиной хрупкого разрушения является циклическое изменение напряженно – деформированного состояния (НДС) и температуры.

Сколы проявляются в отделении относительно большого объема РЧИ. Исследования [30] показали, что поверхности скалывания имеют характерный для хрупкого разрушения кристаллический излом.

Однако при повышении температуры свыше 1300°C возможно наступление пластического течения поверхностных слоев и катастрофический выход инструмента из строя [10]. В этой связи отмечается [30], что предельная температура при обработке углеродистых сталей для ВК8 составляет около 1350°C, а для Т15К6 - 1420-1520°C.

В связи с тем, что процесс резания динамичен, как правило, рассматривают усталостную прочность РЧИ, которая определяется с одной стороны свойствами инструментального материала, а с другой - напряженно–деформированным (НД) и тепловым состоянием (ТС) РЧИ и временными параметрами цикла нагружения.

Одновременно с изменением напряжений под действием силовых нагрузок режущая часть инструмента подвергается переменным тепловым нагрузкам, имеющим большое значение в усталостном разрушении инструментальных материалов. Проблема разрушения материалов при переменных температурных напряжениях является весьма сложной из-за их взаимосвязи и взаимообусловленности. Решению этой проблемы посвящено ряд крупных исследований [29,30 и др.].

Как уже отмечалось, ТТ – процесс нестационарный. Поэтому в предлагаемой методике цикл обработки делится на  $n$  равных частей с периодом  $\Delta\tau$  (рис. 3.37). В каждом из этих интервалов принимается, что параметры процесса резания остаются постоянными. Тогда из условия равенства средних температур на контактных поверхностях составляем систему уравнений. В этой системе уравнений все величины определяются с учетом истории их изменения на предыдущих участках цикла обработки. Вычисленные из этой системы уравнений результирующие тепловые потоки позволяют определить контактные температуры, среднюю температуру резания и другие показатели теплового процесса.

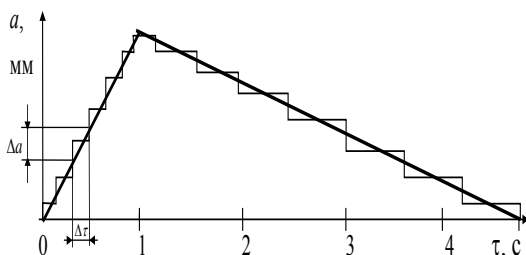


Рисунок 3.37– Схема определения расчетных точек цикла обработки

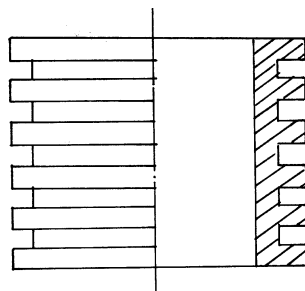


Рисунок 3.38 – Заготовка для свободного ТТ

Для определения средних и максимальных температур в системе резания при свободном тангенциальном точении разработана специальная методика [37, 38], с учетом данных проф. А.Н. Резникова [34, 39], учитывающих указанные отличия процесса ТТ, и алгоритм расчета температурных полей по экспериментальным данным [20].

Анализ контактных температур [21] выполнен при обработке заготовок  $\varnothing 70$  мм из стали ШХ15 ( $\lambda = 33,4$  Вт/м $\cdot$ °С;  $\omega = 0,065$  см $^2$ /с,  $t_{пл} = 1450$  °С) методом свободного попутного тангенциального точения (ПТТ) заготовок (рис. 3.38) резами с механическим креплением пластин из твердого сплава Т15К6 ( $\lambda = 27,2$  Вт/м $\cdot$ °С;  $\omega = 0,100$  см $^2$ /с) с передним статическим углом  $\gamma_0 = -16^\circ$  и задним статическим углом  $\alpha_0 = 16^\circ$ . Режимы обработки изменялись в пределах: скорость резания  $V = 86 \dots 346$  м/мин, тангенциальная подача  $S = 0,5 \dots 1,5$  мм/об; величина снимаемого припуска  $\Delta = 0,5 \dots 1,5$  мм. Были экспериментально определены законы изменения сил резания  $P_z$ ,  $P_y$  и коэффициента усадки стружки  $\xi$  за цикл обработки [35,36]. По

разработанной методике выполнены расчеты температуры резания и контактных температур на поверхностях лезвия в течение цикла обработки, определены величины и направления потоков теплообмена по задней и передней поверхностям и доля теплоты, накапливаемой в заданный момент времени (в цикле обработки) стружкой, заготовкой и инструментом.

Проведенные расчеты показали, что *средняя температура* при тангенциальном точении для указанных режимов обработки находится в пределах от 500°С до 1000°С, Максимальная контактная температура на передней поверхности примерно в 1.3 - 1.5 раза больше средней температуры резания и может достигать температуры плавления обрабатываемого материала при высоких скоростях резания ( $V > 300$  м/мин). В то же время максимальная контактная температура на задней поверхности редко превышает 300°С.

На графике закона изменения температуры резания в течение цикла обработки (рис. 3.39) можно выделить 3 характерных участка. Рассмотрение этих участков способствует построению интегрированных процессов резания.

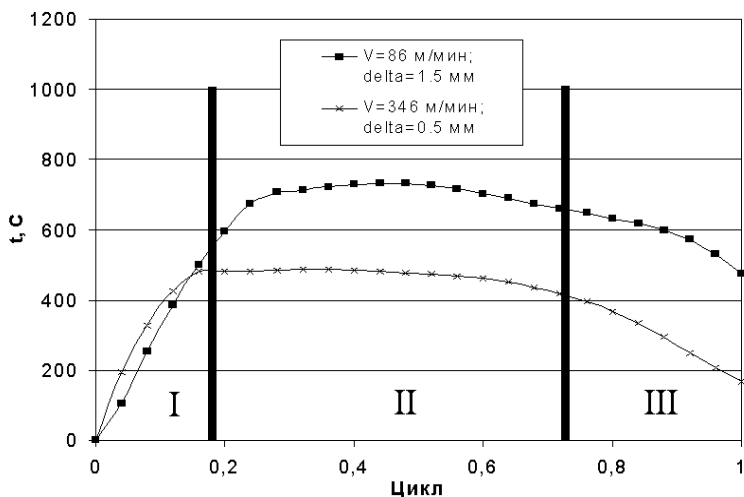


Рисунок 3.39– Характерный закон изменения температуры резания

1. **Первый участок** соответствует изменению толщины среза от  $a = 0$  до  $a \approx a_{\max}$ . На этом участке температура резания резко увеличивается и к концу участка достигает максимального значения. При этом тепловые потоки через поверхности контакта направлены в инструмент и имеют значительную величину, что при малой длительности участка (при принятых режимах не

более 0,15 с) приводит к возникновению большого градиента температур. Это может приводить к интенсивному нагреву до высоких температур (близких к температуре плавления обрабатываемого материала) тонких поверхностных слоев рабочих поверхностей лезвия инструмента на глубину всего около нескольких микрометров. При этом основная масса тела лезвия практически не нагревается.

2. **Второй участок**, как правило, продолжается в течение большей части цикла обработки и заканчивается примерно за 1-3 оборота до его окончания. Он характеризуется относительным постоянством температуры резания или незначительным ее уменьшением.

3. **Третий участок** соответствует концу цикла обработки. На этом участке толщина среза приближается к значению  $\rho/2$ , в результате чего могут отсутствовать стружка и контакт на передней поверхности.

Интенсивность снижения температуры возрастает. Здесь наблюдается резкое перераспределение теплоты между стружкой, инструментом и заготовкой, а основная ее часть направлена в поверхностные слои заготовки. При этом инструмент в зависимости от режима обработки является либо источником теплоты (при больших подачах), либо дополнительно накапливает теплоту (при малых подачах, характеризующихся большей длительностью цикла обработки).

В большинстве случаев к концу цикла обработки температура резания снижается. Однако с уменьшением подачи наблюдается тенденция к увеличению температуры к концу цикла обработки, т.е. максимум температуры резания смещается в эту зону, что можно объяснить значительным влиянием тепловых процессов на задней поверхности и подогревом срезаемого слоя на предыдущих оборотах. Таким образом, на температуру резания при больших подачах определяющее влияние оказывает теплота, выделяемая в результате трения по передней и задней поверхностям, а при малых – теплота деформации, подогрев срезаемого слоя на предыдущих оборотах и теплота трения по задней поверхности.

Для удобства оценки влияния элементов режима обработки представим температуру резания эмпирической формулой:

$$\theta_{cp} = C \cdot \Delta^x \cdot S^y \cdot V^z. \quad (3.30)$$

**Скорость резания.** Анализ результатов расчета показывает, что с увеличением скорости в диапазоне от 87 до 346 м/мин температура резания повышается (рис. 3.40). Это объясняется увеличением мощности, затрачиваемой на процесс резания за счет изменения, главным образом, работы трения, и, следовательно, величин потоков теплообмена. Степень влияния скорости резания на температуру сильно зависит от величины снимаемого припуска: при  $\Delta = 1.5$  мм  $z \approx 0.7$ , а при  $\Delta = 0.5$  мм  $z = 0.25$  ( $S = 0.5$  мм/об).

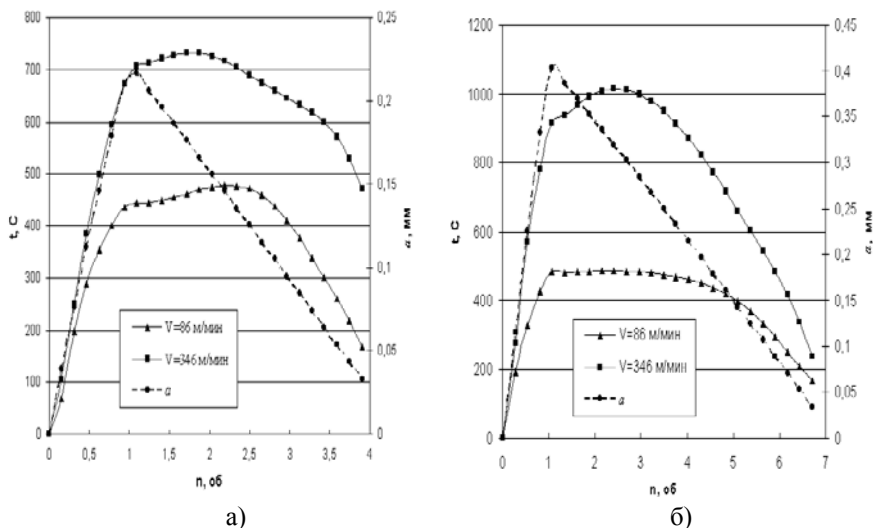


Рисунок 3.40– Зависимость температуры резания от скорости резания  
а)  $\Delta = 1.5$  мм; б)  $\Delta = 0.5$  мм

В то же время  $z$  снижается с увеличением подачи: при  $S = 1.5$  мм/об -  $z \approx 0.55$ , а при  $S = 0.5$  мм/об -  $z = 0.7$  ( $\Delta = 1.5$  мм/об). Это объясняется тем, что при увеличении  $\Delta$  и уменьшении  $S$  увеличивается длительность цикла обработки, за счет чего увеличивается продолжительность участка 2 и, следовательно, преобладающее влияние на температуру оказывает собственно скорость резания.

**Подача.** С увеличением подачи от 0.5 до 1.5 мм/об резко возрастает (более чем в 2 раза) плотность тепловых потоков теплообмена (рис. 3.41).

Однако, при этом температура резания увеличивается (примерно на 25-30%, а в некоторых случаях и на 50%). Степень влияния подачи  $U$  находится в пределах от 0.25 до 0.4 в зависимости от скорости резания и снимаемого припуска. Это можно объяснить существенным увеличением длины контакта стружки с инструментом по передней поверхности и изменением законов распределения контактных давлений совместно с увеличением максимума толщины среза. От подачи существенным образом зависит форма закона изменения температуры резания в течение цикла обработки. При больших подачах температура резания «резко возрастает-постоянна-постепенно падает», а при малых - «резко возрастает-падает-возрастает-резко падает».

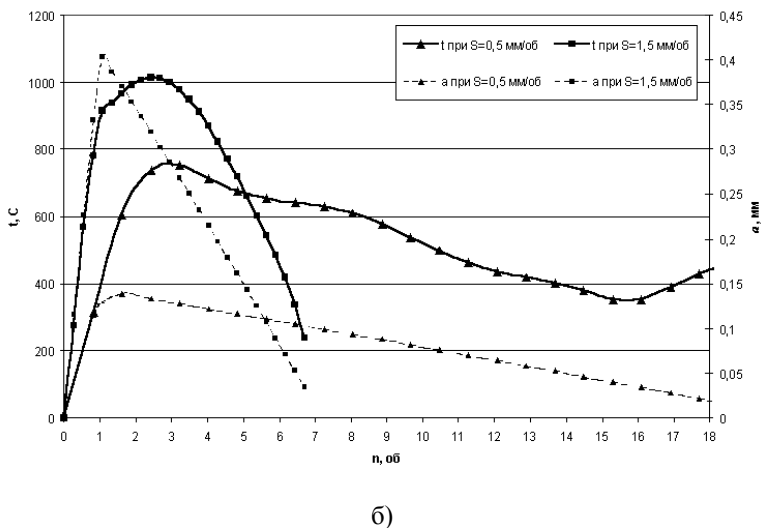
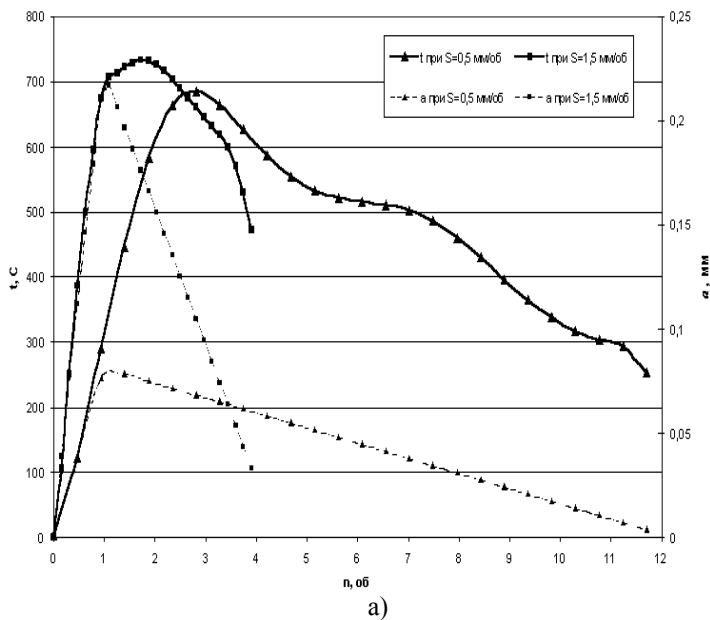


Рисунок 3.41 – Зависимость температуры резания от подачи  
а)  $V=86$  м/мин; б)  $V=346$  м/мин

Это объясняется влиянием различных источников теплоты на температуру резания на различных участках цикла обработки.

**Величина снимаемого припуска.** Изменение величины снимаемого припуска от 0.5 до 1.5 мм существенного влияния на температуру резания не оказывает. Коэффициент его влияния  $\chi$  находится в пределах от 0.02 до 0.25 в зависимости от скорости резания и подачи. Некоторое изменение температуры с увеличением  $\Delta$  вызвано, очевидно, изменением трансформации углов в процессе резания совместно с увеличением максимума толщины среза, а трансформация играет важную роль интеграции процессов.

Величина снимаемого припуска  $\Delta$  сама по себе существенного влияния на температуру резания не оказывает, однако, ее влияние на температуру резания совместно со скоростью очевидно. Это вызвано в основном изменением величины трансформации углов в процессе резания одновременно с увеличением максимального значения толщины среза, а трансформация играет важную роль в интеграции процессов.

Таким образом, из результатов приведенного анализа видно, что основная тепловая нагрузка на инструмент возникает на 1-4 обороте (с момента врезания) из-за большого градиента температур. Можно отметить, что с уменьшением скорости резания и подачи градиент температуры резания также уменьшается. Характер изменения температуры существенно влияет на уровень термических напряжений и, соответственно, на прочность режущей части инструмента (РЧИ).

Рассмотрим влияние термических напряжений на прочность РЧИ для случая обработки внутреннего кольца подшипника 310 на станке-автомате роторного типа мод. КА-350 (см. рис. 3.46). По расчетным данным построены диаграммы цикла термонапряжения РЧИ (рис.3.42): изменение максимальной температуры и максимальной интенсивности напряжений. На рис. 3.42 показано изменение температурного поля и температурных напряжений в системе резания в течение всего цикла «резание-отдых».

Из этих диаграмм хорошо видно, что изменение температуры и напряжений имеет пульсирующий характер и нарастание напряжений происходит с некоторым запаздыванием от нарастания температуры.

При этом нагрев РЧИ от 0 до максимальной температуры происходит за время более чем в 4 раза большее, чем остывание. Этим можно объяснить такие высокие величины эквивалентных напряжений, которые наблюдаются в рассматриваемом случае.

Согласно полученным расчетным путем диаграммам распределения интенсивности напряжений максимальная величина напряжений возникает в тонком слое примерно на середине передней поверхности, т.е. там же, где наблюдаются максимальные градиенты температур. Максимальная величина напряжений наблюдается (табл. 3.3) в начале третьего оборота ( $\sigma_n = 750$  МПа при температуре  $930^\circ\text{C}$ ) и по величине сравнима с пределом прочности на растяжение и пределом текучести при этой температуре.

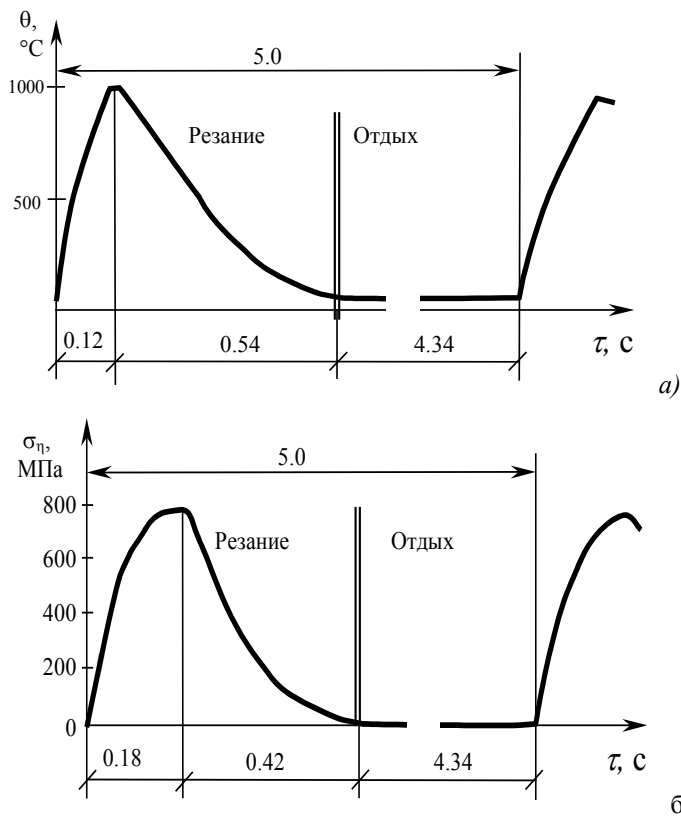


Рисунок 3.42- Цикл изменения максимальной температуры (а) и максимальной интенсивности напряжений (б) в течение цикла «резание-отдых» РЧИ

Из анализа расчетных данных можно также отметить, что в РЧИ величина сжимающих напряжений в начале 3 оборота достигает практически 1800 МПа, что также сравнимо с пределом прочности твердого сплава ВК8 при текущей температуре.

Интересно отметить, что в начале цикла обработки термические напряжения сжатия возникают на задней поверхности инструмента ( $\sigma_n = 139$  МПа) и постепенно перемещаются на переднюю поверхность в течение первого оборота, оставаясь вблизи режущей кромки. Принимая также во внимание большие растягивающие напряжения (около 500 МПа) в этой области, можно утверждать, что именно это явление способствует накоплению повреждений в области у режущей кромки и усталостному ее разрушению (см. рис. 3.43)

Таблица 3.3 – Максимальная температура, главные напряжения в опасной точке, интенсивность напряжений в опасной точке, эквивалентные напряжения в опасной точке по критерию Писаренко-Лебедева и коэффициент запаса прочности в течение цикла «резание-отдых»

$\tau, c$	$n, об$	$\theta_{max}, ^\circ C$	$\theta_{cp}, ^\circ C$	$\sigma_1, МПа$	$\sigma_2, МПа$	$\sigma_3, МПа$	$\sigma_i, МПа$	$\sigma_n, МПа$	$n_0$
Нагрев									
0	0	20	20	0	0	0	0	0	6,1
0,009	0,15	242	145	71	-94	-495	440	139	5,4
0,02. 6	0,2	297	250	48	-69	-680	640	176	2,1
0,03	0,5	728	415	141	-2.64	-1329	2.685	377	1,6
0,06	1	820	629	204	-255	-1716	1654	503	1,4
0,09	1,5	968	700	247	-241	-1939	1890	574	1,3
0,2.6	2	981	757	275	-166	-1954	1917	596	1,1
0,18	3	930	733	559	283	-1872	1843	750	1,3
0,24	4	820	740	434	218	-1482	1462	630	1,3
0,3	5	765	626	434	218	-1538	1520	602	1,9
0,36	6	539	420	294	146	-1077	1070	417	2,9
0,42	7	370	313	232	114	-840	832	326	5,2
0,48	8	195	180	142	67	-460	440	181	8,5
Охлаждение									
0,501	-	155	-	60	-30	-314	314	106	18,4
0,506	-	116	-	56	-21	-224	224	83	-
0,53	-	69	-	36	-13	-113	12.6	46	
5,0	-	20	-	0	0	0	0	0	

Особенности кинематики станка роторного типа и ТТ делает цикл «резание-отдых» РЧИ в условиях обработки этим методом отличным от циклов «резание-отдых», характерных для традиционных методов обработки [29]. Это связано, прежде всего, с импульсным характером термического нагружения и плавным снижением сил резания, и как следствие, мощности тепловых источников после достижения ими максимума на 2-3 обороте цикла обработки. В рассматриваемом случае это время оказалось достаточным для того, чтобы температура успевала перераспределяться в РЧИ с течением времени.

Этим объясняется довольно низкая температура РЧИ после окончания цикла обработки (около 200°C) и, следовательно, малое влияние длительности части цикла «отдых» на термические напряжения.

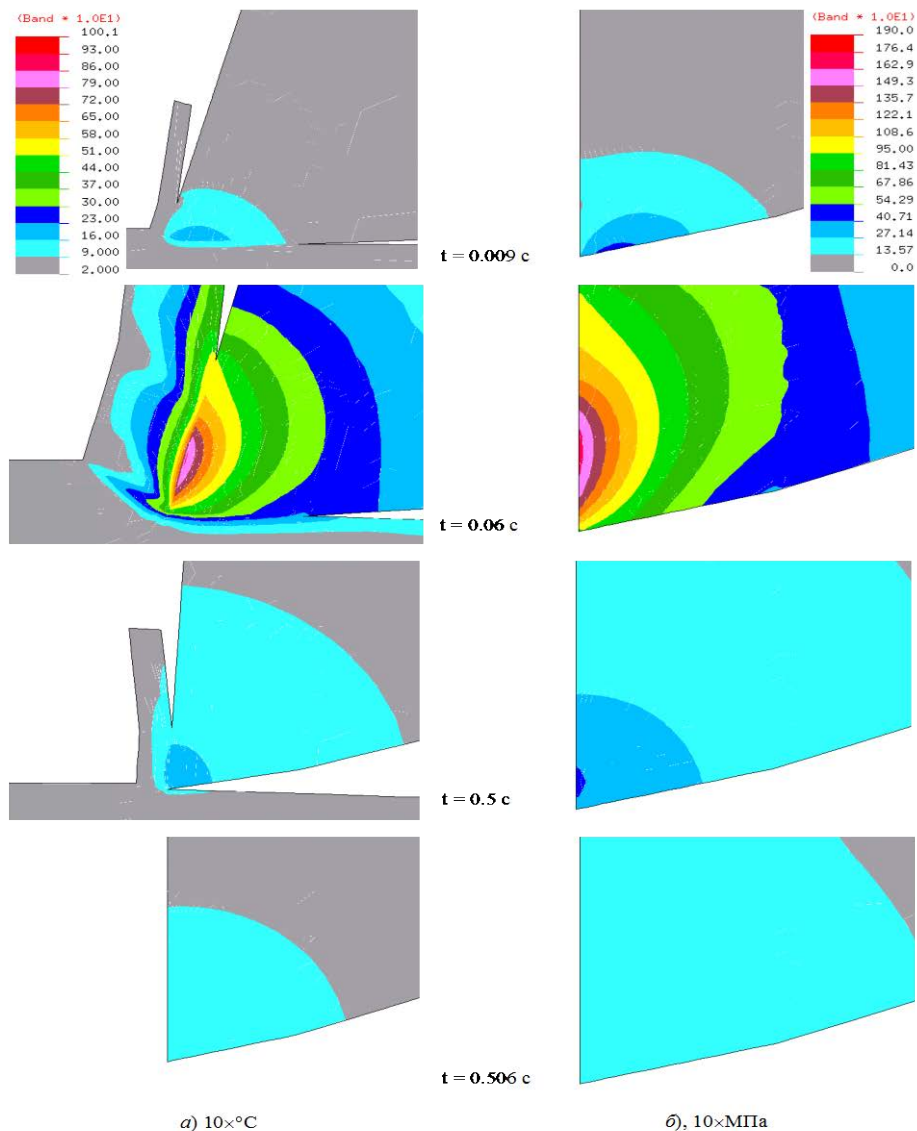


Рисунок 3.43 – Изменение температурного поля и температурных напряжений в системе резания в течение всего цикла «резание-отдых»

Таким образом, физические явления, сопровождающие рассмотренными процессами, могут быть значимыми для выбора признаков возможного интегрирования. Указанные факты позволяют сделать вывод о том, что материал инструмента при больших градиентах температуры достигает своего предельного состояния. Это может привести к появлению усталостных трещин и интенсификации износа инструмента при применении СОТС. Однако необходимо учитывать тот факт, что при совместном действии термических и механических напряжений они могут взаимно дополнять друг друга, тем самым снижая вероятность разрушения. Такое наблюдается при ТТ с малыми скоростями резания ( $V < 80$  м/мин), когда применение СОТС способствует некоторому повышению ресурса инструмента.

### 3.4.5. Практическая реализация тангенциального резания

Применение процесса тангенциального точения рационально в массовом, крупносерийном и серийном типах производства для обработки поверхностей коротких тел вращения, что позволяет повысить производительность обработки, точность и качество обработанной поверхности [21]. Наиболее широкое применение процесс получил в автомобильной промышленности для обработки шеек коленчатых валов (известны станки фирм HELLER, Komatsu Ltd. и др., которые применяются ведущими производителями автомобилей), разработано оборудование и для обработки колец подшипников, зубчатых колес, шкивов и др. деталей машин [21, 42].

Различные схемы тангенциального точения и их особенности выдвигают специфические требования к компоновке (рис. 3.44) и конструкции станков.

Схемы		Одношпиндельные станки		Многошпиндельные станки			
		Одношпиндельные	Многошпиндельные	Одношпиндельные	Многошпиндельные	С двойной индексацией	
Обрабатываемые поверхности	Наружные	Внешнее касание	1	2	3	4	5
		Круговая подача	6	7	8	9	10
	Внутренние	Внутреннее касание	11	12	13	14	19
		Слева и круговая подача	15	16	17	18	

Рисунок 3.44 – Компоновки станков тангенциального точения

Анализируя схемы компоновок станков тангенциального точения, необходимо отметить, что их разнообразие обусловлено преимуществами каждой схемы в конкретных случаях. Схема 1 наиболее подходит для реализации ТТ на универсальных станках, в том числе с ЧПУ (токарных, фрезерных). Например, для реализации этой схемы на фрезерном станке с ЧПУ достаточно оснастить его инструментальными блоками, устанавливаемыми на столе станка неподвижно, и соответствующим зажимным устройством (патроном, цангой и т.п.) для базирования и закрепления заготовки в шпинделе.

Процесс ТТ в отличие от других видов обработки позволяет реализовать роторный принцип действия станков-автоматов (полуавтоматов) непрерывного действия для обработки коротких тел вращения. Этот принцип заключается в наличии шпиндельного барабана, при непрерывном вращении которого происходит круговая подача заготовок, закрепленных в рабочих шпинделях, относительно неподвижно установленных на станине инструментальных блоков (схема 13). Все это обеспечивает ряд преимуществ станков такого типа по сравнению со станками, работающими по традиционной схеме, а именно: высокая жесткость за счет неподвижного закрепления инструментальных блоков, непрерывность процесса обработки за счет совмещения движений подачи и транспортирования заготовки, одновременной работы нескольких режущих инструментов, отсутствия подвижных суппортов и головок, совмещение черновой и чистовой обработок в одной технологической операции. В итоге на станках достигается высокая точность обработки и производительность. При этом станок обеспечивает высокую экологичность и безопасность производства благодаря отсутствию СОТС, закрытой рабочей зоне, электросистеме контроля работы устройств установки и зажима заготовок. На основе этого принципа был разработан многошпиндельный автомат непрерывного действия с тангенциальной схемой резания мод. КА-350 (рис. 3.45) конструкции проф. Шаумяна Г.А. (А.С. СССР № 22.6710). Этот станок позволяет существенно повысить производительность многошпиндельных станков - автоматов (в 3-5 раз), применяемых в крупносерийном и массовом производствах [43].

Автомат отличается простой кинематической схемы (рис. 3.46). Привод шпинделей и шпиндельного блока размещен в верхней части станка и осуществляется от электродвигателя через колеса 1, 2 и 3 на коробку сменных шестерен *a* и *b* и далее через вал на ведущее колесо 10, зацепляющееся с зубчатым венцом 14 центрального блока, второй венец 11 которого приводит во вращение шпиндель через колеса 15. В позиции загрузки и выгрузки соединение шпинделя с колесом 15 размыкается гидромuftой. Вращение шпиндельного блока с венцом червячного колеса 17 осуществляется от червяка 16 через червячную передачу 12 и 13, сменные шестерни круговых подач *c* и *d*, зубчатые колеса 8, 6, 18, 9 от колеса 4 на валу *IV*.

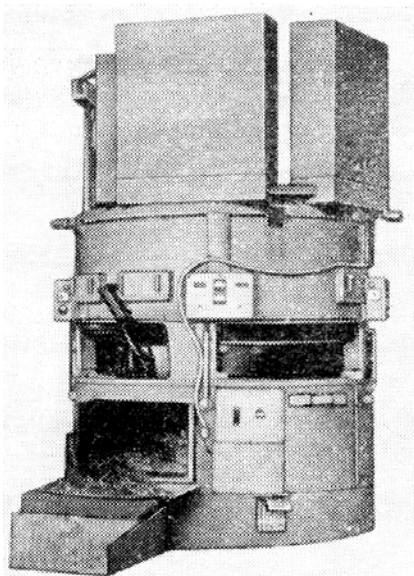


Рисунок 3.45 –  
Вертикальный 12-ти  
шпиндельный  
автомат непрерывного  
действия мод. КА-350

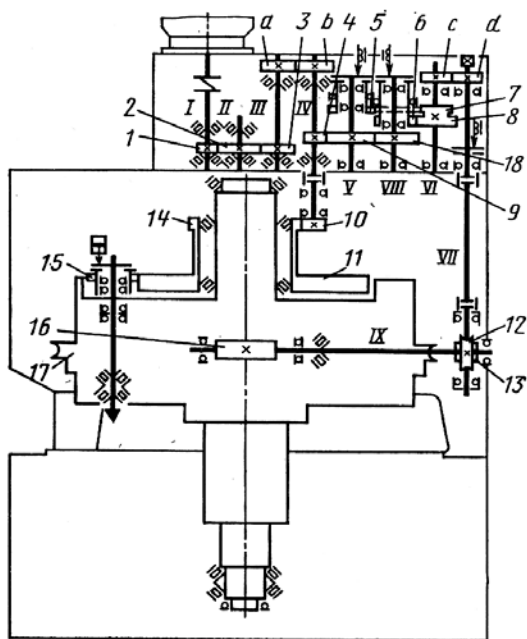


Рисунок 3.46 – Кинематическая схема станка мод. КА-350

В приводе вращения шпиндельного блока оригинально предусмотрено предотвращение ударов при попутном направлении силы резания к вращению шпиндельного блока. Червяк 13 является элементом, дозирующим скорость вращения шпиндельного блока до величины, определяемой кинематической цепью круговых подач.

В приводе вращения шпиндельного блока предусмотрен обратный ход через зубчатые колеса 4, 9, 5 и 7 и далее по кинематической цепи подач при соответствующем переключении электромагнитных муфт зубчатых колес 5 и 6.

Автомат предназначен для черновой и чистовой обработки наружных поверхностей, торцов, наружных и внутренних фасок коротких тел вращения ( $\varnothing 100 \times 70$ ).

На станке мод. КА - 350 обработка ведется на двух потоках (рис. 3.47), причем на каждом потоке одновременно обрабатывается несколько деталей.

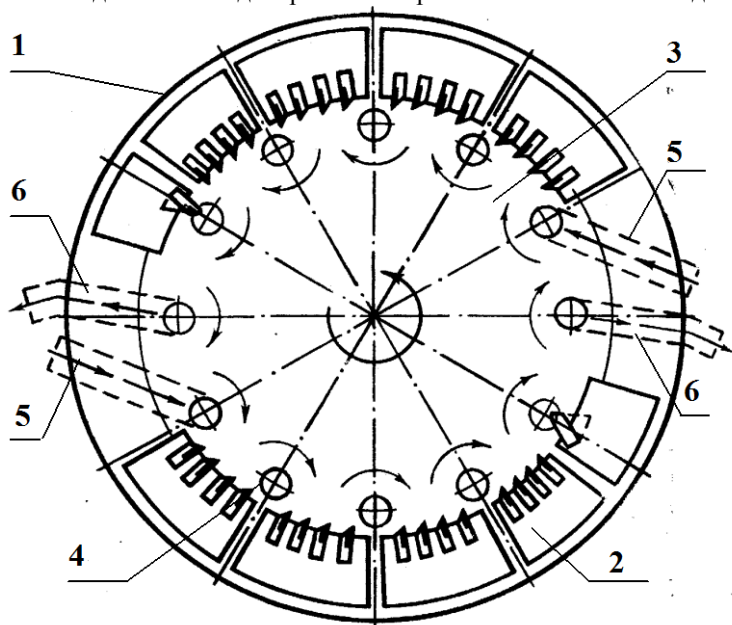


Рисунок 3.47 – Компоновка станка мод. КА-350:

- 1 – станина; 2 – блоки инструментов; 3 – шпиндельный блок;
- 4 – шпиндель; 5 – устройство загрузки; 6 – устройство выгрузки

Станок оснащен системами автоматической загрузки 5 и выгрузки 6 деталей без остановки шпиндельного барабана. Автомат имеет рациональную компоновку, удобен в наладке и обслуживании, обеспечивает высокую точность обработки (овальность детали 0,01 – 0,02 мм) при шероховатости обработанной поверхности  $R_a=0,8-2,0$  мкм [21]. Высокая точность и чистота

обработки достигается вследствие применения принципа действия, исключающего периодические остановы шпиндельного блока 3 и механизмы фиксации; неподвижно расположенного в резцовых блоках 2 на станине станка 1 инструмента 4, удобного в настройке и подналадке; вследствие высокой жесткости станка, меньших сил резания и отсутствия пиковых нагрузок по циклу обработки. При этом необходимо иметь в виду, что при обработке на станке КА-350 точность формы в значительной мере зависит не только от кинематики ТТ и режима резания, но и от конструктивных параметров обрабатываемой системы и размеров детали – радиуса обработки и радиуса расположения шпинделей [44].

Обработка осуществляется по схеме внутреннего касания с попутной тангенциальной подачей, которая сообщается шпиндельному блоку 3 со шпинделями и закрепленными в них заготовками. Режущие инструменты (при обработке внутреннего кольца подшипника 310 на двух потоках - 36 резцов в пластинками из твердого сплава) закреплены неподвижно в инструментальных блоках на станине, имеют простую конструкцию (рис.3.48), кроме последнего (в случае необходимости – фасонного), независимо от вида формируемого профиля.

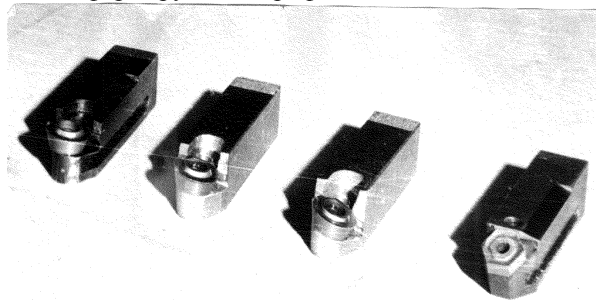


Рисунок 3.48 – Резцы с механическим креплением пластин из твердого сплава для обработки внутреннего кольца подшипника

Резцы в инструментальных блоках расположены в соответствии с принятой схемой срезания припуска (рис. 3.49) по мере перемещения заготовки от зоны загрузки заготовки до зоны выгрузки готовой детали.

Применение технологии ТТ совместно с рациональной компоновкой оборудования позволяет существенно снизить себестоимость продукции за счет существенного повышения производительности обработки. На рисунке 3.50 представлены сравнительные результаты обработки внутреннего кольца подшипника 310 (материал сталь ШХ15) твердосплавным инструментом на станке КА-350 (штучная заготовка) по схеме ТТ (рис. 3.49) с типовым процессом токарной обработки этого кольца на 6 - шпиндельном токарном автомате мод. 1А240П-6 (заготовка – труба).

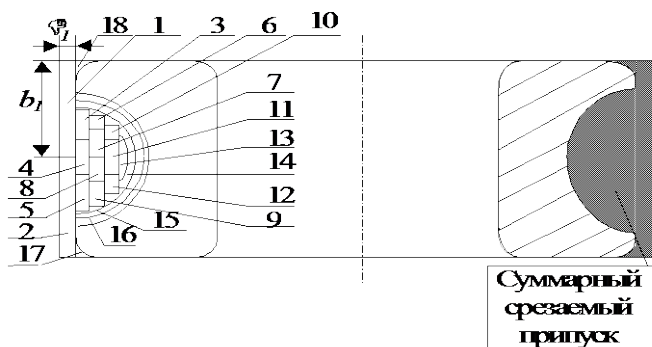


Рисунок 3.49 – Схема снятия припуска при обработке внутреннего кольца подшипника на станке КА-350

Эскиз	Оборудование и режим обработки	Позиция обработки					Производительность, шт/ч
		1	2	3	4	5	
 сталь ШХ15	1А240П-6 $V=70\text{м/мин}$ $S=0,3\text{мм/об}$						Позиция загрузки 70
	КА-350 $V=220\text{м/мин}$ $S=1\text{мм/об}$						

Рисунок 3.50 – Сравнительная характеристика традиционной токарной и тангенциальной видов обработки внутреннего кольца подшипника 310 ГОСТ 8338-75 по данным [21]

При тангенциальном резании представляется возможность использования для токарной обработки этих поверхностей широких резцов с большими углами наклона режущей кромки (рис. 3.51а), что позволяет за счет изменения площади сечения среза и продолжительности времени контакта (количества оборотов) инструмента с заготовкой путем изменения угла наклона инструмента  $\lambda$  (рис. 3.51б) управлять режимом нагружения лезвия и динамическим состоянием системы.

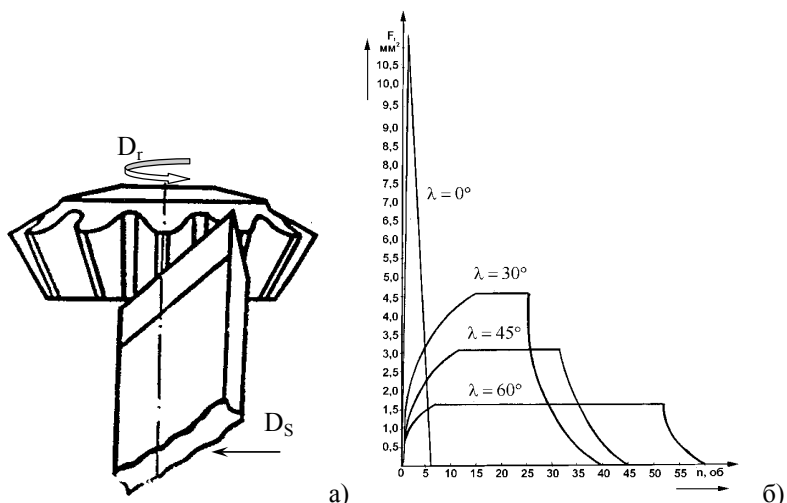


Рисунок 3.51 - Обработка заготовки с предварительно штампованными зубьями широким резцом с большим углом наклона режущей кромки и тангенциальной подачей

Благодаря указанной возможности, можно считать, что одним из перспективных направлений повышения эффективности обрабатывающих систем с тангенциальной схемой резания за счет увеличения номенклатуры изготавливаемых на них деталей, является обработка заготовок шестерен с предварительно штампованными зубьями (рис.3.53а). При традиционно применяемых схемах резания токарная обработка таких заготовок, осуществляемая методами копирования (рис. 3.52), как правило, характеризуется интенсивным разрушением лезвий инструмента и преждевременным выходом из строя обрабатывающей системы в первую очередь из-за неблагоприятного ее динамического состояния за счет сопровождающих процесс точения прерывистых поверхностей ударных нагрузок.

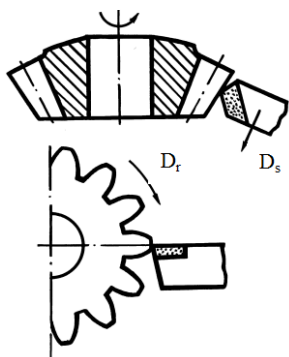


Рисунок 3.52 - Обработка заготовки с предварительно штампованными зубьями методом копирования (традиционная схема обработки)

Таким образом, специфические особенности процесса тангенциального резания (кратковременность контакта инструмента с заготовкой, нестационарность процесса резания за счет непрерывной трансформации углов лезвия, изменения толщины среза и др.) позволяет производить обработку как фасонных, так и прерывистых поверхностей деталей из различных материалов, в том числе и труднообрабатываемых, со скоростями резания и подачами, значительно превышающими традиционно применяемые. Например, точение стали ШХ15 без охлаждения на станке мод. КА-350 осуществляется с подачами 1,2-1,5 мм/об и скоростями резания в 3-4 раза более высокими (до 500 м/мин (табл. 34)), чем при традиционно применяемых процессах обработки. При этом обеспечиваются требуемая точность обработки и высокая производительность, а, соответственно, и экономическая эффективность обрабатывающей системы.

Таблица 3.4 - Сравнение режимов обработки при точении с различными схемами резания

Обрабатываемый материал	Условия точения	Скорость резания V, м/мин		Подача S, мм/об	
		Традиционное точение	Тангенциальное точение	Традиционное точение	Тангенциальное точение
Сталь ШХ15	Наружное точение (без ударов)	93-104 (карта 6, с. 44)	325	0,6 – 0,75 (карта 1, с. 36)	1,4
	Фасонное точение	107-120 (карта 19, с. 64)	325	0,13 - 0,16 (карта 18, с. 63)	1,4
18ХГНТА	Наружное точение (с ударами)	72-87 (карта 6, с. 45)	480	0,6 – 0,75 (карта 1, с. 36)	1,4
	Фасонное точение	107-120 (карта 19, с.64)	480	0,13 - 0,16 (карта 18, с.63)	1,4

Кроме того, исследования кафедры технологи машиностроения, станков и инструментов Сумского государственного университета показали [46], что применение жидких СОТС снижает потребительские свойства процесса ТТ, и следовательно, нет необходимости в их применении при ТТ. Именно поэтому процесс ТТ является экологически чистым процессом обработки и, следовательно, перспективным для применения в первую очередь в машиностроении при обработке коленчатых валов, подшипников, зубчатых колес и других деталей машин. Он позволяет существенно повысить

производительность обработки (рис. 3.50), точность и качество обработанной поверхности. Вместе с тем, следует отметить, что применение уже разработанных к настоящему времени технологий тангенциального точения является рациональным только для обработки коротких поверхностей тел вращения в массовом и крупносерийном производствах.

Одними из путей повышения производительности обрабатываемых систем непрерывного действия с тангенциальной схемой резания является увеличение количества потоков (рис. 3.53) [48] и групповой обработки [51].

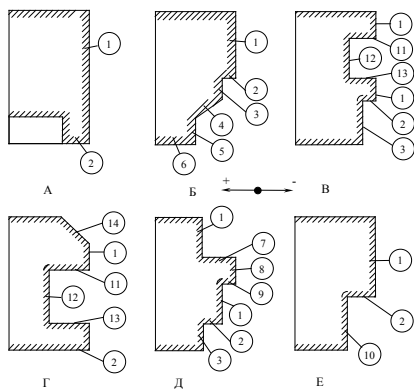
Как известно, процесс формообразования на станках может быть представлен как результат движения образующей производящей линии по направляющей. На станках рассматриваемого типа образующая получается методом копирования, то есть она является копией формы суммы режущих кромок инструментов. Именно этот факт может быть положен в основу классификации деталей, подлежащих обработке на роторных автоматах.

При построении групповых процессов за основу берется характерная образующая линия данной группы, которая по аналогии с комплексной деталью может быть названа «комплексным профилем». Под комплексным профилем понимается реальный или условный профиль, содержащий все основные участки линий, характерные для образующих деталей данной группы. Различие в диаметральных размерах поверхностей теоретически может быть компенсировано возможностью регулировки радиального положения шпиндельных узлов автомата.

В общем случае поверхность детали должна совпадать с комплексным профилем (детали А и Б на рис. 3.53). Однако в целях укрупнения групп в них могут включаться и детали, не полностью соответствующие данному правилу. Это, во-первых, детали, отдельные элементы поверхности которых имеют отклонение «минус» от комплексного профиля (детали В и Г).

Во-вторых, детали с элементами поверхности, имеющими отклонения в «плюс» (детали Д и Е). Возможно и сочетание указанных признаков. На рисунке 3.53 элементы комплексного профиля пронумерованы цифрами от 1 до 6. Имеется ввиду, что каждый из них на чистовых проходах обрабатывается одним резцом. Поверхностям, не входящим в комплексный профиль, присвоены номера от 7 и выше.

В соответствии с приведенным делением деталей и группе и решается вопрос о порядке расстановки



**Рисунок 3.53 - Формирование комплексной детали**

Детали группы	Обрабатываемые поверхности													
	Зона I					Зона II					Зона III			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
А	○	○									∅			
Б	○	○	○	○	○	○					∅			
В	○	○	○								○	○	○	∅
Г	○	○									○	○	○	○
Д	○	○	○				○	○	○		∅			
Е	○	○								○	∅			

Рисунок 3.54 - Расстановка резцов в инструментальных блоках

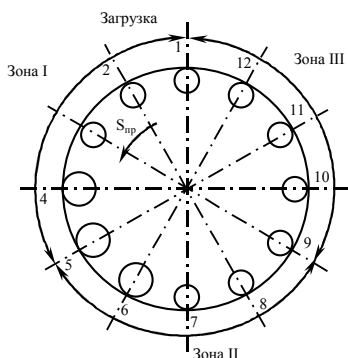


Рисунок 3.55 - Порядок прохождения зон различными деталями при групповой обработке

инструмента в инструментальных блоках (рис.3.54).

В зоне I, следующей за загрузочной позицией, устанавливается инструмент, осуществляющий обработку комплексного профиля за исключением поверхностей с отклонениями от него (детали Д и Е, поверхности 7,8,9,10; детали В и Г, поверхности 11, 12, 13, 14). В зоне II размещается инструмент, производящий обработку «выступающих» поверхностей (детали Д и Е, поверхности 7,8,9,10). В зоне III - инструмент, обрабатывающий поверхности 11-14 деталей В и Г. Порядок прохождения деталями зон обработки приведен на рисунке (рис. 3.55).

Связующим звеном между обрабатываемой заготовкой и станком является станочное приспособление. Применение принципов групповой технологии предполагает наличие гибкой оснастки. Применительно к станочным оправкам гибкая схема закрепления реализуется при использовании широкодиапазонных оправок, оправок с автоматической сменой зажимных элементов либо устройств автоматической смены оправок.

Следует обратить внимание на тот факт, что благодаря особенностям тангенциального течения, и в первую очередь кратковременности процесса резания, его такие выходные показатели, как ресурс инструмента,

динамическое состояние системы и качество обработанной поверхности значительно менее чувствительны к изменению свойств обрабатываемого материала, диаметра обрабатываемой (обработанной) поверхности (скорости резания), ее вида (гладкая цилиндрическая, коническая, фасонная или прерывистая, например, с предварительно штампованными зубьями) и состояния (прокат, литье, штамповка и др.), что позволят производить обработку различных заготовок с одинаковыми значениями подачи и частоты вращения шпинделя. Этому способствует и возможность управления (на стадии проектирования инструментальной оснастки) объемом срезаемого одним резцом материала (величины пропуска  $\Delta$  и ширины среза, т.е. количества инструментов).

Для станков с трехпоточной структурой (рис. 3.56, д) цикловая производительность возрастает в 1,5 раза по сравнению с двухпоточной (рис.3.56, а, б, в, г).

Универсальность оборудования определяется номенклатурой обрабатываемых на нем деталей. Учитывая высокую производительность роторных автоматов, их универсальность можно трактовать в более широком смысле, а именно, с точки зрения количества различных деталей, закрепленных за станком или одновременно обрабатываемых на нем. Станок мод. КА-350 спроектирован для обработки на двух потоках (рис. 3.47) внутреннего кольца подшипника 310(02) с годовой программой 2 млн. штук, что соответствует массовому производству. При замене (полной или частичной) оснастки (цанги, инструментальные блоки, загрузочные

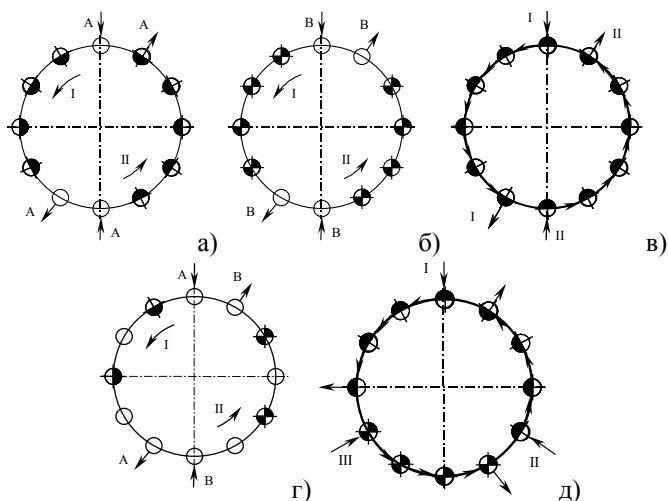


Рисунок 3.56 - Структура многопоточного автомата с последовательными потоками: а, б, в, г) двухпоточная структура (станок мод. КА-350); д) трехпоточная структура

устройства и т.п.) можно обрабатывать на этом станке и другие детали (рис. 3.56,б) (кольца, шестерни, шкивы и др.) примерно с такой же годовой программой. Одним из перспективных решений повышения гибкости и ремонтпригодности подобного оборудования может быть использование модульного принципа конструирования, в частности, применения шпиндельных модулей. Такие известные фирмы, как SKF, "Fanuc" и другие, разработали и изготавливают целую гамму шпиндельных модулей. Особый интерес в данном случае представляют модули со встроенным электроприводом (электрошпиндели). Их применение может обеспечить многошпиндельным роторным автоматам целый ряд преимуществ. Во-первых, в сфере изготовления. Как считается, одна из причин недостаточной точности вращения шпинделей и их жесткости (виброустойчивости) - недостаточная точность сопряженных деталей. Серийный выпуск шпиндельных модулей, когда и подшипники и сопряженные детали изготавливаются на специализированных (подшипниковых) заводах, позволит решить эту проблему. Во-вторых, в сфере эксплуатации оборудования. Значительно повышается его ремонтпригодность. неполадки в шпиндельном узле устраняются его заменой другим с дальнейшим ремонтом вне станка. Быстроте замены способствует и то, что шпиндельные модули изготавливаются без внешней системы смазки с пластичной смазкой, закладываемой на весь срок службы узла.

Применение независимых электрошпинделей позволит устранить еще один фактор, оказывающий отрицательное влияние на производительность станков типа КА-350 и номенклатуру обрабатываемых на нем деталей, - это неизменная частота вращения шпинделей в течении всего цикла обработки деталей. Между тем, при вращении шпиндельного блока на заготовке, закрепленной в шпинделе, последовательно обрабатываются поверхности различного профиля и размеров (гладкая цилиндрическая поверхность, коническая прерывистая поверхность, фасонная или плоская торцевая поверхность и т.п.), для каждой из которых может быть определена своя оптимальная скорость резания. Группируя инструмент в блоках в зависимости от обрабатываемых поверхностей и устанавливая в пределах зоны работы блока свою оптимальную частоту вращения, тем самым можно существенно повысить стойкость инструмента, качество обработки и надежность работы станка. Решению этой задачи в значительной степени будет способствовать использование управляемых шпиндельных модулей с независимым приводом, а, следовательно, возможность вращения их с различными друг от друга частотами в зависимости от зоны их расположения в данный момент времени.

При использовании модульного принципа конструирования и применения шпиндельных модулей с автономным приводом и возможностью их перемещения в радиальном и осевом направлениях относительно оси

колонны, на которой они устанавливаются, может быть обеспечена одновременная обработка различных деталей с соответствующим радиальным положением отдельных шпинделей (рис. 3.57, а, б) или различным осевым положением заготовки на шпинделях (рис. 3.57, в).

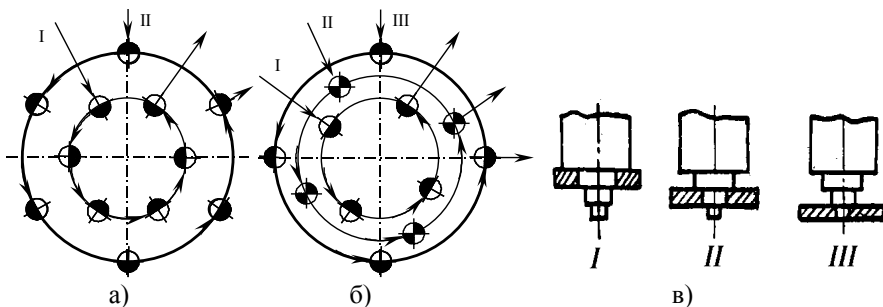
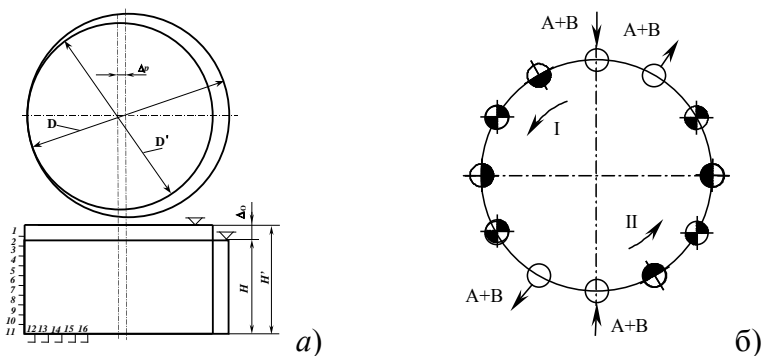


Рисунок 3.57 - Схемы радиального (а, б) и осевого (в) разделения потоков

К деталям, обработку которых можно совмещать на станках такого типа, могут быть отнесены детали, имеющие одинаковый профиль, но различные диаметральные размеры. Это, в частности, шкивы клиноременных передач одинакового профиля, звездочки цепных передач, шестерни и т.п.

На станке с перемещающимися в осевом и радиальном направлениях шпиндельными модулями можно оптимальным образом совмещать одинаковые профили (рис. 3.58, а) смещением деталей в осевом направлении относительно нижнего торца на величину  $\Delta_o = H - H'$ , а в радиальном на  $\Delta_p = (D - D')/2$ , что позволяет реализацию схемы обработки с загрузкой каждого потока в рассматриваемом случае двумя деталями, каждая из которых устанавливается на соответствующий шпindel (рис. 3.58, б).



$$\Sigma P_{(A+B)} = 16 \times 2 = 32$$

Рисунок 3.58 - Двухпоточная структура станка непрерывного действия со схемой одновременной обработки двух деталей

При рассматриваемой организации работы станка каждый поток комплектуется абсолютно одинаковыми оснасткой и инструментами, причем количество потоков (2, 3 и более) определяется поставленной задачей, количеством инструментов в одной наладке (на одном потоке) и габаритами станка. Кроме того, ограничением количества одновременно обрабатываемых деталей с одинаковыми профилями (в пределах возможного для данного станка диапазона размеров) практически может являться только количество шпинделей и число принятых потоков. При определении числа одновременно обрабатываемых деталей необходимо обязательно обеспечивать их кратность числу шпинделей на потоке. Например, при двухпоточной структуре 12-ти шпиндельного станка при совмещении профилей обрабатываемых деталей их может быть 2, 3 или 6, при трехпоточной – 2 или 4, при четырехпоточной – только 3. Следует обратить внимание на тот факт, что производительность станка практически не зависит от количества одновременно обрабатываемых на потоке деталей.

Практическая реализация рассмотренных принципов проектирования многопоточных структур станков с тангенциальной схемой резания невозможна без выполнения такого показателя гибкости оборудования, как переналаживаемость, которая обеспечивается, в первую очередь, применением быстропереналаживаемой оснастки. В качестве зажимных устройств на станке КА-350 используют станочные цанговые оправки с «жесткими» размерами. Для более полной реализации приведенных выше схем и повышения гибкости станков рекомендуется использовать следующие гибкие системы станочных оправок [49]:

- 1) широкодиапазонные (с автоматическим регулированием диапазона закрепления);
- 2) групповые наладочные, состоящие из постоянной базовой конструкции и сменных зажимных элементов или наладок;
- 3) автоматически сменяемые оправки;
- 4) многоступенчатые с несколькими установочными базовыми поверхностями различного диаметра.

С целью повышения универсальности инструментальных блоков, применяемых при тангенциальном точении, и сокращения времени на наладку и переналадку станка необходимо использовать резцы с инструментальными надставками. В разработанном инструментальном блоке для смены резцовых надставок используется тот же принцип, что и в системе BTS фирмы Sandvik Coromant. Это позволяет производить, в том числе, и автоматическую смену инструментов.

Одним из резервов расширения технологических возможностей и повышения производительности станков-автоматов является принцип совмещения традиционных методов обработки с высокопроизводительным тангенциальным резанием, реализованным в многошпиндельном токарном

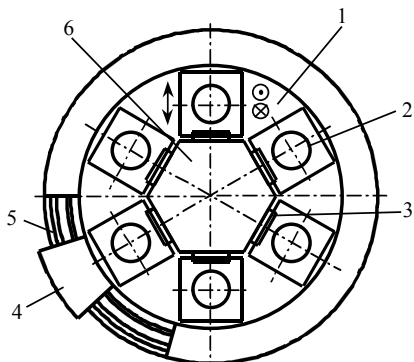


Рисунок 3.59 - Станок с комбинированными схемами резания

станке (А.с. 1445859, Патент UA №14099) [50]. Принцип работы станка заключается в следующем (рис.3.59).

На станине станка установлен поворотный стол 1 с рабочими шпинделями 2, несущими обрабатываемые заготовки и кинематически связанными с электродвигателем главного привода двумя цепями: цепью продольного точения суппортами 3, установленными на колонне 6, и цепью тангенциального точения суппортами 4, установленными на станине станка

После окончания обработки во всех рабочих позициях суппортами 3, (продольное точение, сверление отверстий, нарезание резьбы и т.п.) они быстро отходят в исходные положения. После этого происходит быстрый поворот стола со скоростью  $S_{СТ}$  для смены рабочих позиций. Одновременно с этим осуществляется круговая подача суппортов 4 по направляющим 5 со скоростью  $V_{СКР}$ . Разность скоростей поворота стола и суппортов ( $V_{СТ} - V_{СКР}$ ) равна величине скорости тангенциальной подачи  $V_{СТ}$ . Таким образом, без снижения скорости холостого хода (поворота стола) обеспечивается необходимая тангенциальная подача при обработке соответствующих поверхностей заготовок по тангенциальной схеме резания.

### 3.5. Резание инструментом из быстрорежущей стали с покрытиями

Нанесение тонких вакуумно-плазменных покрытий (пленок), толщиной не более 5 мкм, на поверхности режущего инструмента из быстрорежущей стали позволяет во многих случаях повысить его стойкость, либо увеличить параметры режима резания, что приводит к повышению экономической эффективности механической обработки. Однако для определения областей и условий эффективного применения быстрорежущего инструмента с покрытиями необходимо знать особенности процесса резания и роль покрытия в формировании этих условий.

#### 3.5.1. Влияние покрытий на условия резания, износ и стойкость инструмента из быстрорежущей стали

В мировой практике металлообработки все большее применение находят инструменты с износостойкими покрытиями. Тонкие «пленочные» покрытия толщиной от 2 до 10 мкм наносят на рабочие поверхности заточенного и доведенного инструмента с целью изменения условий его работы при резании

и улучшения его эксплуатационных характеристик. Снижение сил и температур резания на 20-40% позволяет повысить стойкость режущего инструмента в 2 и более раз или увеличить скорость резания от 20 до 60%, а также значительно улучшить шероховатость обработанной поверхности.

К износостойкому покрытию для режущего инструмента предъявляется ряд требований:

- 1) высокая микротвердость, в 1,5-2 раза превышающая твердость инструментального материала;
- 2) значительное сопротивление к поверхностному усталостному разрушению;
- 3) низкая склонность к адгезии (химическому взаимодействию) с обрабатываемым материалом;
- 4) сохранение основных свойств при высоких температурах, стойкость против коррозии и окисления;
- 5) минимальная способность к диффузионному растворению в обрабатываемом материале;
- 6) высокая прочность сцепления с инструментальным материалом.

Некоторые из этих требований могут носить взаимоисключающий характер, например, низкая адгезия к обрабатываемому материалу и высокая прочность сцепления с инструментальным материалом. В данном случае целесообразнее всего наносить многослойные или композиционные покрытия. У многослойных покрытий нижний слой, который прилегает к инструментальному материалу, обеспечивает крепкое сцепление с ним, а верхний - минимальное схватывание с обрабатываемым материалом. Промежуточные слои могут исполнять роль соединительных, слоев с тепловыми барьерами или слоев, препятствующих продвижению трещин при разрушении покрытий. Разновидностью многослойных покрытий являются градиентные покрытия. Например, для быстрорежущего инструмента состав покрытия может постепенно переходить от нитрида циркония (ZrN), который обеспечивает наилучшее сцепление с железосодержащей инструментальной подложкой, к нитриду ниобия (NbN), который дает аномально низкое схватывание с железосодержащими обрабатываемыми материалами, например, сталями.

Наибольшее распространение для нанесения износостойких покрытий на режущий инструмент получили методы химического осаждения из газовой фазы (ХОП) или методы CVD, термодиффузионное насыщение поверхности (ТДН) и физическое осаждение из газовой фазы (ФОП) или PVD.

Накопленный опыт эксплуатации инструментов с покрытиями уже позволяет определять условия, при которых достигаются наибольшие повышения их работоспособности. Инструменты из быстрорежущей стали с покрытиями показывают значительное повышение стойкости при разных видах обработки углеродистых, конструкционных и низколегированных сталей, а также серых чугунов низкой и средней твердости. При обработке

титановых и жаропрочных сплавов на основе никеля, высоколегированных и высокопрочных сплавов эффективность от применения инструментов с покрытием существенно ниже, а в ряде случаев и даже отрицательна.

При одинаковой стойкости износостойкие покрытия позволяют на 20-30% увеличить скорость резания. Наибольший эффект применения инструментов достигается при резании с малыми  $a < 0,05$  мм и средними  $a = 0,1-0,25$  мм толщинами срезаемого слоя. В первом случае это происходит за счет повышения износостойкости задней поверхности инструмента, а во втором - за счет торможения роста лунки изнашивания на передней поверхности. При толщинах срезаемого слоя  $a = 0,05-0,10$  мм, а также  $a > 0,3$  мм покрытие интенсивно разрушается, в первом случае из-за высоких нагрузок на покрытие со стороны задней поверхности, а во втором - со стороны передней поверхности. Эти рекомендации необходимо учитывать при назначении режимов резания.

Необходимо отметить, что, невзирая на более высокую стоимость инструментов с покрытиями, расходы потребителя на обработку единицы продукции по сравнению с аналогичными расходами при применении непокрытых инструментов ниже, благодаря повышению или стойкости инструмента, или скорости резания и, соответственно, производительности обработки. В промышленно развитых странах выпуск инструментов из быстрорежущей стали с покрытиями составляет около 70% всех типов инструментов.

### **3.5.2. Взаимосвязь контактных характеристик и параметров стружкообразования при резании инструментами из быстрорежущей стали**

Одним из основных достижений в изучении механики процесса резания является установление и экспериментальное подтверждение того факта, что при резании металлов в связи с наличием свободной поверхности (наружная сторона стружки) происходит приспособляемость основного очага деформации (зоны стружкообразования) к условиям взаимодействия прирезцово́й стороны стружки с передней поверхностью инструмента в контактной зоне (рис. 3.60). Считается, что свойства материала инструмента влияют на процесс стружкообразования значительно меньше, чем свойства обрабатываемого материала. Однако заметное влияние на параметры стружкообразования оказывают *теплопроводность инструментального материала и его контактная активность*. Теплопроводность действует преимущественно через среднюю температуру контакта, а контактная активность между материалом инструмента и обрабатываемым материалом через коэффициент трения [5]. Основное влияние на коэффициент трения оказывает адгезионная активность между инструментальным и обрабатываемым материалами, под которой понимают способность инструментального материала к схватыванию или химическому соединению с материалом стружки во время ее движения по передней поверхности.

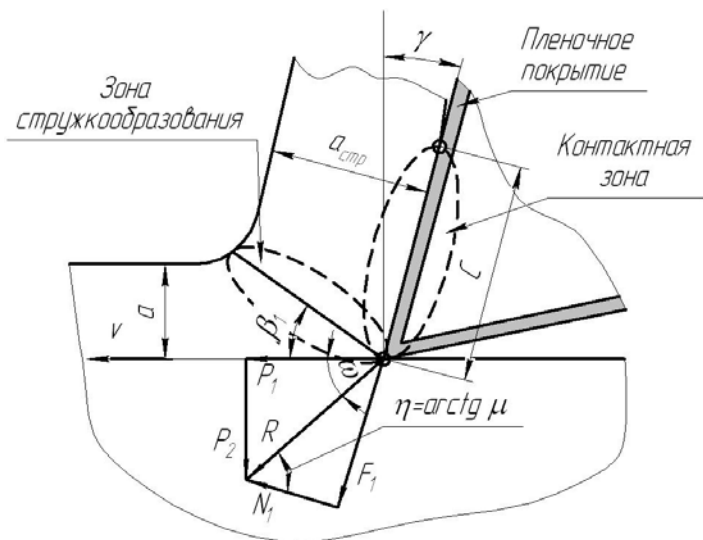


Рисунок 3.54– Упрощенная схема стружкообразования  
(в главной секущей плоскости –  $P_\tau$ ):

$P_1, P_2$  – вертикальная и горизонтальная составляющие силы резания на передней поверхности, Н;  $N_1, F_1$  – нормальная и сила трения на передней поверхности, Н;  $R$  – сила стружкообразования, Н;  $C$  – длина контакта стружки с передней поверхностью, мм;  $\beta_1$  – угол наклона условной плоскости сдвига, град.;  $\omega$  – угол действия, град;  $\eta$  – угол трения, град.  $\mu$  – средний коэффициент трения;  $a$  – толщина среза, мм;  $a_{стр}$  – толщина стружки, мм;  $v$  – скорость резания, м/с

Прочно соединенные с поверхностью инструмента, тонкие пленочные покрытия могут иметь различный химический состав и способны существенно влиять на адгезионную активность между инструментом и стружкой и таким образом оказывать влияние на изменение как условий стружкообразования, так и условий изнашивания инструмента.

На рис. 3.60 приведена упрощенная схема стружкообразования (с одной плоскостью сдвига) на основании которой удобно проводить анализ влияния покрытия на основные контактные характеристики процесса резания.

К основным контактным характеристикам относят среднюю температуру контакта –  $\bar{\Theta} \text{ } ^\circ\text{C}$ , длину контакта стружки с передней поверхностью –  $C$ , удельную силу трения по передней поверхности –  $q_f$  и среднее контактное давление –  $q_n$ .

В качестве главного из параметров процесса стружкообразования принимают усадку стружки, определяемую коэффициентом ее утолщения

$$K_a = \frac{a_{cmp}}{a} \quad (3.31)$$

где  $a$  – толщина среза, мм;  $a_{cmp}$  – толщина стружки, мм.

Усадка стружки по сравнению с характеристикой относительного сдвига является не совсем точным отражением деформационных процессов в зоне стружкообразования, однако, для практических нужд является исключительно информативной характеристикой.

Если экспериментально измерить значение сил  $P_1$  и  $P_2$ , длину контакта –  $C$  и усадку стружки  $K_a$ , то из рис. 3.61 можно рассчитать:

– среднее контактное давление на передней поверхности:

$$q_n = \frac{P_1 \cos \gamma - P_2 \sin \gamma}{b_{cmp} C} \quad (3.32)$$

– средний коэффициент трения на передней поверхности:

$$\mu = \frac{P_1 \operatorname{tg} \gamma + P_2}{P_1 - P_2 \operatorname{tg} \gamma} \quad (3.33)$$

– удельную силу трения на передней поверхности:

$$q_f = q_n \cdot \mu \quad (3.34)$$

где  $P_1$  – вертикальная составляющая силы резания, Н;  $P_2$  – горизонтальная составляющая силы резания, Н;  $\gamma$  – передний угол инструмента, град;  $C$  – длина контакта стружки с передней поверхностью инструмента, мм;  $b_{cmp}$  – ширина стружки, мм.

Установлена простая связь [5] между процессами, происходящими в зоне стружкообразования и на контактной поверхности в виде зависимости (3.35).

$$\frac{C}{a} = K_a^l \quad (3.35)$$

где  $C$  – длина контакта на передней поверхности;  $a$  – толщина среза;

$K_a$  – коэффициент утолщения стружки;  $l$  – показатель степени.

Наличие этой связи между контактными характеристиками и стружкообразованием позволяет экспериментально доказать, что адгезионная активность между материалом тонкого пленочного покрытия и обрабатываемым материалом может оказывать существенное влияние на формирование важнейших параметров процесса резания и определять работоспособность инструмента.

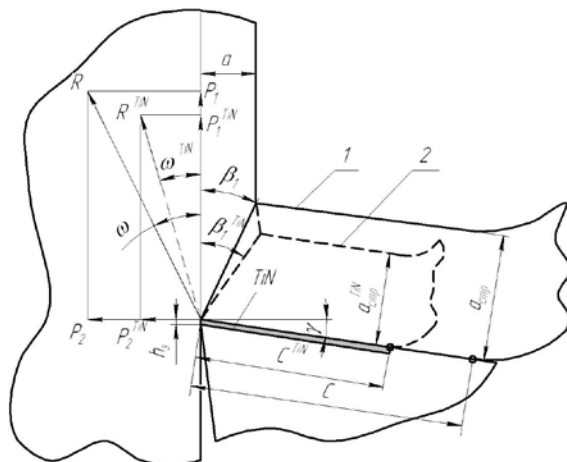


Рисунок 3.61 – Схема стружкообразования при точении стали 45  
 1 – Инструмент без покрытия – P6M5; 2 – Инструмент с покрытием – P6M5+TiN;

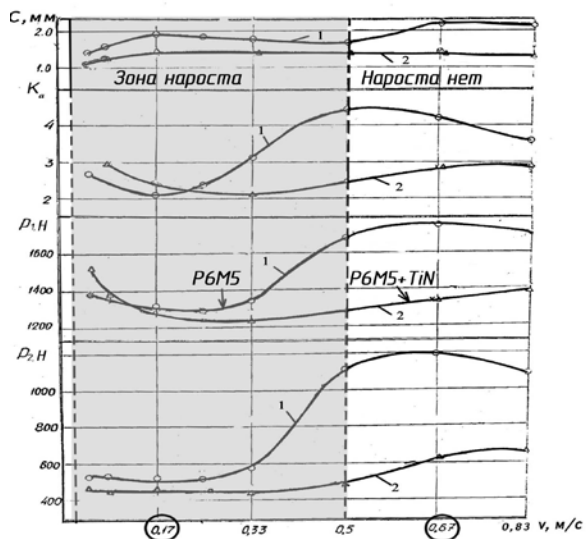
$R$  – сила стружкообразования, Н,  $\omega$  – угол действия, град,  
 $\beta_1$  – угол наклона условной плоскости сдвига, град.

Условия обработки:

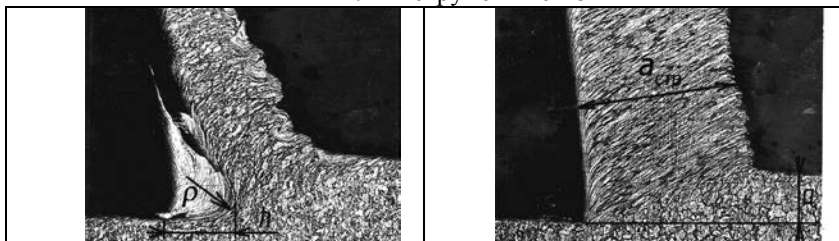
толщина среза  $a=0,3$  мм, ширина среза  $b=1,5$  мм,  $\gamma=10^\circ$ ,  $\alpha=8^\circ$

### 3.5.3. Влияние покрытия на основные характеристики процесса резания

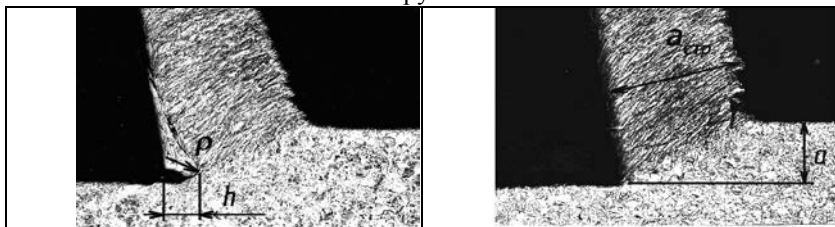
На рис. 3.62 представлены экспериментальные результаты измерения длины контакта стружки с передней поверхностью –  $C$ , усадки стружки –  $K_a$ , вертикальной –  $P_1$  и горизонтальной –  $P_2$  составляющих силы резания, при точении стали 45 режущими пластинами из быстрорежущей стали P6M5 без покрытия и с покрытием TiN (P6M5+TiN) в широком скоростном диапазоне  $v=0,017...0,83$  м/с. Покрытие TiN имеет золотой цвет, высокую микротвердость, износостойкость и прочность сцепления с подложкой и в течение многих лет является базовым вакуумно-плазменным пленочным покрытием для режущего инструмента. Для инструмента без покрытия получены классические «типичные» кривые [53], на которых при скоростях ниже  $v=0,5$  м/с наблюдается резкое снижение усадки стружки  $K_a$  и составляющих сил резания  $P_1$  и  $P_2$ . Это снижение связано с формированием нароста, который увеличивая фактический передний угол  $\gamma_\phi$  уменьшает объемы пластических деформаций при стружкообразовании. При увеличении скорости выше зоны вырождения нароста  $v>0,5$  м/с снова наблюдается постепенное снижение  $K_a$ ,  $P_1$ ,  $P_2$ .



1. Инструмент P6M5



2. Инструмент P6M5+TiN



$v=0,17$  м/с

$v=0,67$  м/с

x63

Рисунок 3.62 – Влияние покрытия TiN на характер «типичных» кривых и условия стружкообразования 1 – P6M5, 2 – P6M5+TiN.

Свободное ортогональное точение Стали 45

При резании инструментом с покрытием величины  $K_a$ ,  $P_1$ ,  $P_2$  и  $C$  значительно меньше, чем у инструмента без покрытия. На рис. 3.62 представлены также и фотографии корней стружек, полученных путем быстрого выведения инструмента из зоны резания.

Совместное рассмотрение графиков и фото подтверждает, что при изменении скорости резания процессы стружкообразования протекают по разному. В зоне низких скоростей происходит наростообразование, а с увеличением скорости выше  $v=0,5$  м/с нарост вырождается в тонкий заторможенный слой материала стружки на передней поверхности. Покрытие оказывает существенное влияние на форму и размеры нароста, приводит к уменьшению высоты нароста –  $h$  и радиуса его вершины –  $\rho$ , повышает его устойчивость от разрушения по сравнению с наростом на инструменте без покрытия. При скоростях резания инструментом с покрытиями выше зоны наростообразования  $v=0,67$  м/с толщина стружки –  $a_{стр}$  значительно меньше, чем без покрытия. Отношение  $K_a = \frac{a_{стр}}{a}$  и определяет усадку стружки.

Принципиальная схема влияния покрытия на контактные условия и стружкообразование при точении стали 45 приведена на рис. 3.61 для скоростей выше зоны наростообразования.

Можно видеть, что на инструменте с покрытием уменьшается сила стружкообразования  $R$  и уменьшается угол действия этой силы –  $\omega$ . Однако, при этом, увеличивается угол наклона условной плоскости сдвига –  $\beta_1$ , который определяет величину площади сдвига, уменьшая ее размеры.

Приведенная схема показывает, что процесс резания инструментом с износостойким покрытием TiN протекает энергетически более выгодно, чем без покрытия, т.е. с меньшей затратой работы на пластическое деформирование срезаемого слоя в стружку. Следствием этого является меньшее количество тепла, выделяемого при работе инструментом с покрытием.

На рис. 3.63 показано распределение контактной температуры на передней поверхности при точении Стали 45 инструментом с покрытием и без, а также максимальные  $\Theta_{max}$  и средние  $\bar{\Theta}$  температуры контакта, рассчитанные по методике А.Н. Резникова [57]. Результаты расчетов показывают, что средние  $\bar{\Theta}$  и максимальные контактные температуры  $\Theta_{max}$  на инструменте с покрытиями на 50–60°C ниже, чем без покрытия. Однако, если распределения контактных температур расположить в одном масштабе длины контакта, то видно, что на инструменте с покрытием на участке, приближающемся к режущей кромке, температуры на 50° С выше.

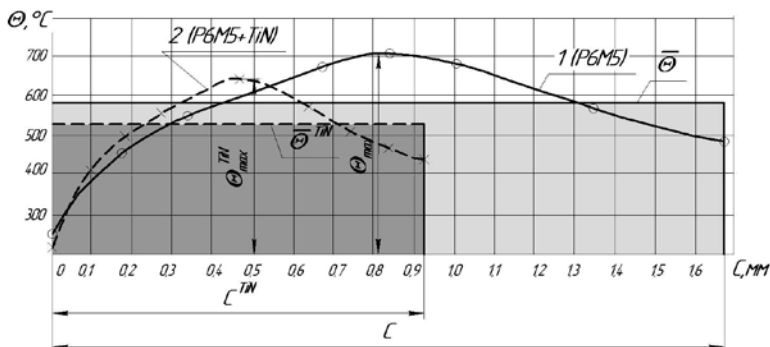


Рисунок 3.63 – Распределение контактных температур  $\Theta = f(C)$

на передней поверхности инструмента при точении стали 45

1 – P6M5, 2 – P6M5+TiN.  $\Theta_{max}^{TiN}$ ,  $\Theta_{max}$ ,  $\bar{\Theta}^{TiN}$ ,  $\bar{\Theta}$  – максимальные и средние контактные температуры на передней поверхности инструмента с покрытием и без покрытия.

Условия эксперимента:  $v=1$  м/с,  $a=0,27$  мм,  $v=1,4$  мм, без СОТС)

Эти результаты показывают, что несмотря на то, что общее количество тепла, выделяемое при резании инструментом с покрытием становится меньше, снижая среднюю и максимальную контактные температуры, но из-за существенного сокращения длины контакта  $C$  зона инструмента, примыкающая к режущей кромке, нагревается сильнее, поэтому теплостойкость инструментального материала на который наносится покрытие, должна быть высокой. На рис. 3.64 показаны распределения нормальных контактных напряжений  $\sigma$  рассчитанных по методике Н.Н. Зорева [54].

При расчете нормальных напряжений  $\sigma$  учитывают измеренные значения сил  $P_1$  и  $P_2$  и длину контакта  $C$ . Распределение напряжений в реальном масштабе длины контакта стружки  $C$  для инструмента с покрытием и без по которому видно, что силы резания на инструменте с покрытием меньше. Однако, если рассмотреть распределение нормальных напряжений на контактных площадках разных инструментов, длину которых принять за единицу  $C=1$ , то можно видеть, что нормальные напряжения  $\sigma$  на равных долях участков контакта у инструментов с покрытиями выше. Естественно выше и среднее контактное давление –  $q_n$ . Этот важный результат, *более высокого среднего контактного давления на инструменте с покрытиями*, позволяет объяснить особенности возникновения заторможенного слоя в лунке износа инструмента с покрытиями (рассмотренного в п. 1.3), приводящего к повышению его стойкости.

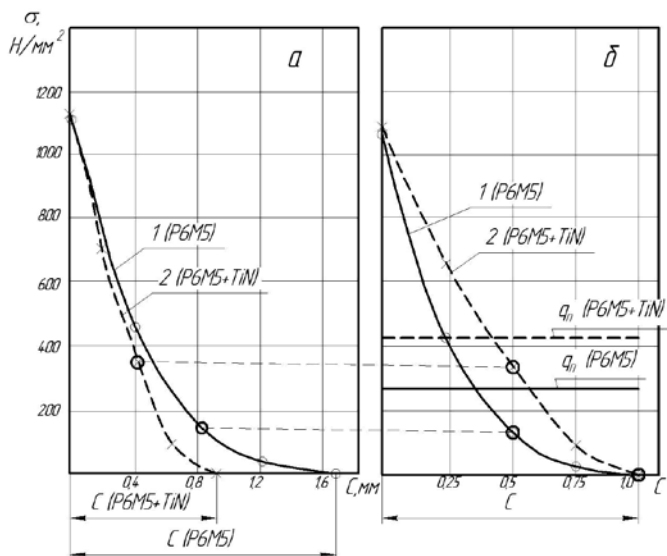


Рисунок 3.64– Распределение нормальных напряжений  $\sigma$  на передней поверхности инструмента при точении Стали 45

1 – P6M5, 2 – P6M5+TiN.  $q_n$  – среднее контактное давление;

а – в реальном масштабе длины контакта стружки с передней поверхностью; б – длина контакта –  $C$  для инструмента с покрытием и без покрытия принята за единицу  $C=1$ . (Условия резания показаны на рис. 3.62)

Таким образом, несмотря на снижение сил  $P_1$  и  $P_2$  при резании инструментом с покрытиями, среднее контактное давление стружки на переднюю поверхность –  $q_n$  выше из-за более интенсивного сокращения длины контакта –  $C$ .

Удельная сила трения по передней поверхности  $q_f$  является малоизменяемой величиной для каждого обрабатываемого материала и в основном определяется сопротивлением этого материала сдвигу.

Поэтому средний коэффициент трения

$$\mu = \frac{q_f}{q_n}$$

зависит от уровня среднего контактного давления  $q_n$ , которое может изменяться в широких пределах при изменении условий контактирования.

На рис. 3.65 приведены расчетные значения среднего коэффициента трения стружки  $\mu$  на передней поверхности.

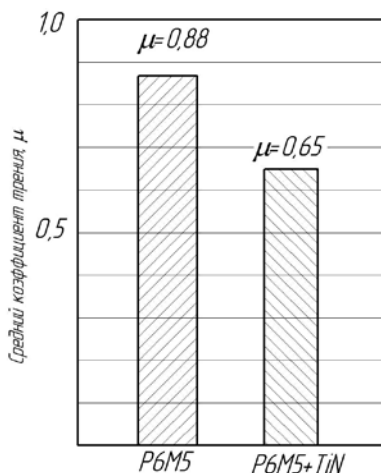


Рисунок 3.65 – Средний коэффициент трения на передней поверхности –  $\mu$  при точении стали 45



Рисунок 3.66 – Вид стружки при точении стали 45 а – P6M5, б – P6M5+TiN

Видно, что у инструмента с покрытием значение  $\mu=0,65$  ниже, чем у инструмента без покрытия  $\mu=0,88$ , но это снижение связано с повышением контактного давления  $q_n$ .

Форма и вет стружки (рис. 3.66) определяется толщиной окисной пленки при ее нагреве и косвенно характеризует уровень температуры при ее деформации. Таким образом показано, что тонкие ( $\leq 5$  мкм) пленочные покрытия нанесенные на поверхность режущего инструмента способны существенно изменять условия контактирования со стружкой и влиять на ее образование. Причиной этому является **изменение условий трения**. Для подтверждения этого важного вывода приведены результаты еще одного эксперимента, в котором на инструмент после нанесения покрытия TiN (не вынимая его из вакуумной камеры) сверху был нанесен дополнительный тонкий адгезионно активный слой (АСС) материала, близкого по химическому составу с обрабатываемым материалом - Сталью 45.

Таким образом на поверхности инструмента было сформировано двухслойное покрытие (TiN+ACC). На рис. 3.67 представлены резцы с покрытиями которые имеют различную адгезионную активность к обрабатываемому материалу.

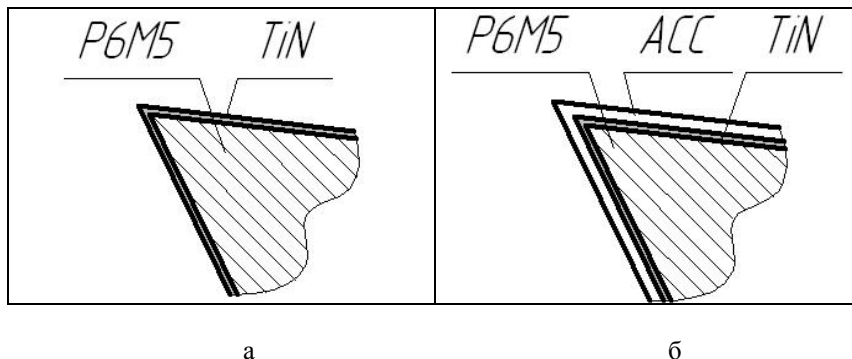


Рисунок 3.67 – Резцы с покрытиями  
 а – P6M5+TiN (низкая адгезионная активность);  
 б – P6M5+TiN+ACC (высокая адгезионная активность).

Результаты исследований показывают, что адгезионная активность поверхностного слоя инструмента, который контактирует со стружкой, существенно влияет на условия резания. Тонкий адгезионно-активный к обрабатываемому материалу поверхностный слой покрытия в зоне скоростей выше наростообразования увеличивает длину контакта –  $C$ , усадку стружки –  $K_a$  и составляющие силы резания  $P_1$  и  $P_2$  (рис. 3.68.)

Корни стружек, полученные на скорости  $v=0,25$  м/с, при которой наблюдается максимальная высота нароста на инструменте без покрытия, на инструменте с покрытием TiN показывает резкое снижение высоты нароста, а при нанесении на покрытие TiN дополнительного ACC высота нароста снова существенно увеличивается.

Итак, приведенные результаты исследований показывают, что **тонкие поверхностные контактные слои инструмента способны изменять условия трения и существенным образом влиять на условия стружкообразования.**

Однако условия трения на передней поверхности инструмента зависят от величины нормального напряжения –  $\sigma$  со стороны стружки, которое постепенно снижается при удалении от вершины. Обычно между стружкой и передней поверхностью инструмента на различных участках имеют место два вида трения, различные по своей природе (рис. 3.69, а).

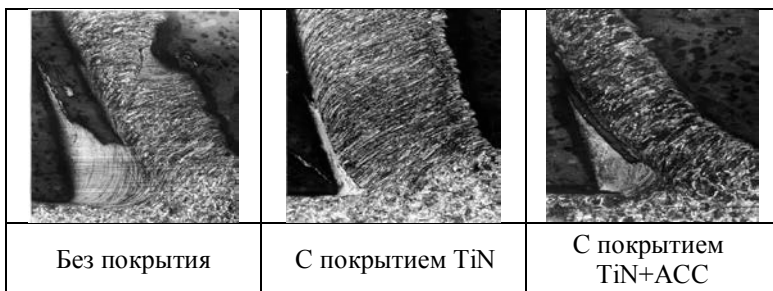
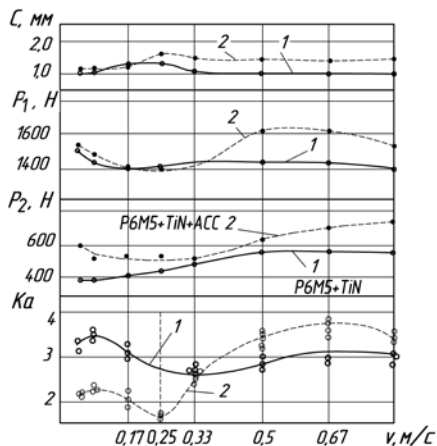


Рисунок 3.68 – Влияние адгезионно активного слоя (ACC) покрытия на характер «типичных» кривых и наростообразование  
1 – P6M5+TiN, 2 – P6M5+TiN+ACC.

Условия эксперимента: свободное ортогональное точение стали 45,  $a=0,3$  мм,  $b=1,5$  мм,  $\gamma=10^\circ$ ,  $\alpha=8^\circ$ ,  $v=0,017\dots 0,83$  м/с.

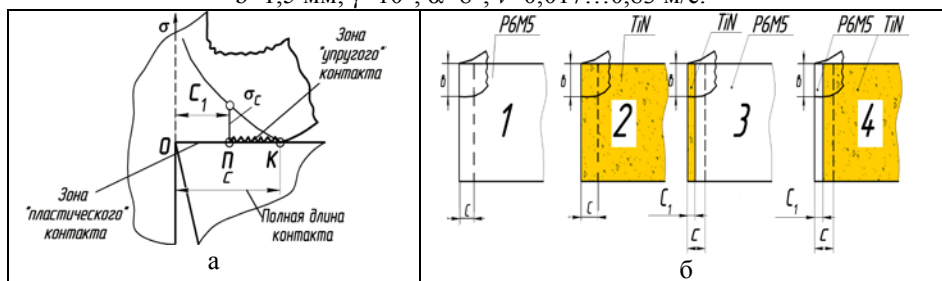


Рисунок 3.69 – Условия контактирования стружки с передней поверхностью инструмента

а – двухзональная модель трения, б – варианты передней поверхности с зонами различной адгезионной активности

В первой зоне – ОП, прилегающей к режущей кромке инструмента, нормальное напряжение  $\sigma$  столь значительное, что наблюдается сплошной контакт между материалом стружки и передней поверхностью, а движение материала стружки проходит за счет внутренних сдвигов в заторможенном слое стружки. Эта часть контакта –  $C_1$  называется зоной «пластического контакта». Протяженность участка пластического контакта  $C_1$  для стали 45 составляет 0,4–0,5 от общей длины контакта –  $C$ .

Во второй зоне – ПК, несколько удаленной от режущей кромки, где нормальное напряжение  $\sigma$  значительно меньше, перемещение стружки сопровождается исключительно внешним скольжением. Разделение контактных процессов в двухзонной модели связано с понятием **граничного нормального напряжения**  $\sigma_c$ , где на участке сплошного «пластического» контакта ОП напряжение  $\sigma_c$  выше, а на участке «упругого» контакта ПК –  $\sigma_c$  ниже. Таким образом, адгезионная активность контактной поверхности инструмента может быть характеристикой, изменяющей процесс стружкообразования. Однако важно понимать то обстоятельство, какая зона контакта («пластического» или «упругого») играет определяющую роль в формировании условий стружкообразования. На рис. 3.70 приведены «типичные» кривые значений  $C$ ,  $K_a$ ,  $P_1$  и  $P_2$ , для инструментов с различными зонами адгезионной активности, показанные на рис. 3.69, б. Рассматривали 4 варианта: 1 – вся контактная (передняя) поверхность без покрытия, 2 – контактная поверхность полностью имеет покрытие TiN, 3 – покрытие TiN нанесено только на пластическом участке  $C_1$ , 4 – на пластическом участке  $C_1$  покрытие TiN отсутствует, т.е. в зоне контакта оно имеет место только на участке ПК.

Тонкие полоски у режущей кромки в вариантах 3 и 4 позволяют создать различные условия молекулярного схватывания на «пластическом» и «упругом» участках контакта передней поверхности со стружкой.

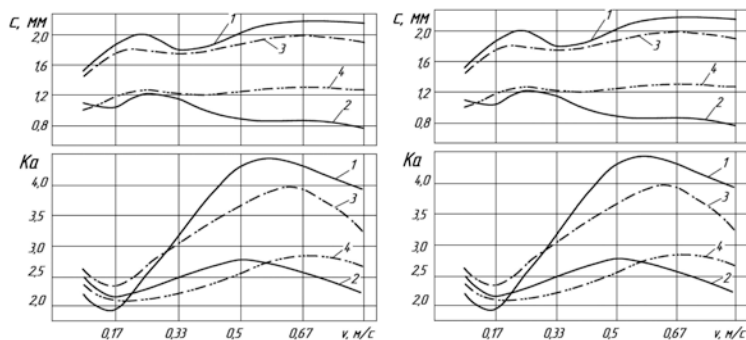


Рисунок 3.70 – Типичные кривые для инструментов с различными зонами адгезионной активности

Рассмотрение «типичных» кривых показывает, что кривые влияния основных контактных характеристик и усадки стружки от скорости резания расположились парами, причем наблюдается строгая закономерность состава пары. Пару образуют инструменты с одинаковыми условиями трения на втором – «упругом» участке контакта. Первая пара: варианты 1 и 3 и вторая пара: варианты 2 и 4. У первой пары в зоне «упругого» контакта нет покрытия, а у второй пары имеется. Таким образом, можно утверждать, что **влияние адгезионной активности контактной поверхности инструмента проявляется на «упругом» участке контакта, что и приводит к изменению условий резания.**

В рассмотренном выше случае, *при обработке стали 45* величина «упругого» участка составляет приметно 0,5-0,6 от общей длины контакта – *S*. Однако, это соотношение зависит от вида обрабатываемого материала, причем, чем труднее обрабатывается материал, тем участок «упругого» контакта становится меньше и составляет 0,2-0,1 от общей длины контакта – *S* или вообще, стружка контактирует с резцом в условиях полного пластического контакта.

Таким образом, **если при резании труднообрабатываемых материалов зона «упругого» контакта становится намного меньше зоны «пластического» контакта, то и влияние покрытия на изменение условий трения и стружкообразования должно быть менее значительным или вообще не существенным.** В табл. 3.4 приведены коэффициенты относительной адгезионной активности  $K_{адг}$  покрытия из нитрида титана TiN к различным обрабатываемым материалам в сравнении с эталоном из быстрорежущей стали P6M5.

Таблица 3.4 – Коэффициенты относительной адгезионной активности  $K_{адг}$  покрытий из TiN к различным обрабатываемым материалам

Контактная поверхность инструмента	Обрабатываемый материал							
	Сталь45		12X18H10T		XH77TIOP		BT1–00	
	$\Delta F/S$	$K_{адг}$	$\Delta F/S$	$K_{адг}$	$\Delta F/S$	$K_{адг}$	$\Delta F/S$	$K_{адг}$
P6M5 (эталон)	0,140	1,0	0,35	1,0	0,349	1,0	0,485	1,0
TiN	0,046	<b>0,33</b>	0,07	<b>0,20</b>	0,288	<b>0,82</b>	0,603	<b>1,24</b>

*Примечание:*  $\Delta F/S$  – удельная сила трения.

Из таблицы видно, что каждый обрабатываемый материал, отличающийся химическим составом друг от друга, имеет различную относительную адгезию к покрытию из нитрида титана. Минимальную относительную адгезию  $K_{адг}=0,20$  имеет хромоникелевая сталь на основе

железа 12Х18Н10Т, у стали 45  $K_{адз}=0,33$ , у жаропрочного сплава на никелевой основе ХН77ТЮР  $K_{адз}=0,82$ .

Титановый сплав ВТ1–00 имеет  $K_{адз}=1,24$ , т.е. схватывается с покрытием TiN активнее, чем с быстрорежущей сталью Р6М5. В табл. 3.5 приведены значения длины контакта стружки с передней поверхностью инструмента и усадки стружки для рассмотренных выше обрабатываемых материалов при точении их резцами из быстрорежущей стали Р6М5 с покрытием TiN и без покрытия на различных скоростях резания.

Таблица 3.5 – Влияние покрытия на длину контакта и усадку стружки при точении различных обрабатываемых материалов

Сталь 45					12Х18Н10Т				
Скорость резания, м/с	Длина контакта С, мм		Усадка стружки $K_a$		Скорость резания, м/с	Длина контакта С, мм		Усадка стружки $K_a$	
	Р6М5	Р6М5+TiN	Р6М5	Р6М5+TiN		Р6М5	Р6М5+TiN	Р6М5	Р6М5+TiN
0,5	1,7	1,30	4,4	2,5	0,166	0,48	0,46	2,42	2,78
0,67	2,2	1,35	4,3	2,9	0,33	0,47	0,43	3,46	3,58
0,83	2,1	1,30	3,6	2,8	0,5	0,46	0,46	2,75	2,90
					0,67	0,49	0,43	2,55	2,53
					0,83	0,42	0,41	2,21	2,16
ХН77ТЮР					ВТ1–00				
Скорость резания, м/с	Длина контакта С, мм		Усадка стружки $K_a$		Скорость резания, м/с	Длина контакта С, мм		Усадка стружки $K_a$	
	Р6М5	Р6М5+TiN	Р6М5	Р6М5+TiN		Р6М5	Р6М5+TiN	Р6М5	Р6М5+TiN
0,018	0,52	0,51	3,06	3,09	0,018	0,15	0,15	1,19	1,22
0,05	0,56	0,54	3,15	3,08	0,083	0,15	0,15	1,11	1,12
0,083	0,56	0,56	2,62	2,61	0,166	0,16	0,16	1,13	1,09
0,166	0,58	0,56	2,79	2,77					

Результаты измерений показывают, что несмотря на различие в активности адгезионного схватывания разных обрабатываемых материалов с покрытием TiN существенный эффект в изменении длины контакта и усадки стружки наблюдается только при точении Стали 45. Из этого можно сделать

важный вывод, что нанесение тонких покрытий на инструмент при резании труднообрабатываемых материалов не оказывает влияния на контактные условия и стружкообразование и поэтому не может быть эффективным приемом повышения их работоспособности. Однако, для большого количества конструкционных и легированных обрабатываемых материалов на основе железа, чугунов и ряда цветных сплавов нанесение тонких покрытий на режущий инструмент является очень эффективным приемом для повышения качества обработки и стойкости инструментов. Объем обрабатываемых материалов, при резании которых наблюдается значительное увеличение работоспособности инструмента с покрытием, составляет 80% от всего объема обрабатываемых материалов, а для 20% труднообрабатываемых материалов нанесение покрытий на режущий инструмент малоэффективно.

### **3.5.4. Износ и стойкость инструмента с покрытием**

На формирование места расположения и вида очага износа инструмента влияют: свойства обрабатываемого материала, режимы резания (скорость и толщина среза), геометрия инструмента, условия обработки (непрерывное или прерывистое резание, с постоянным или переменным сечением среза), а также адгезионная активность контактной поверхности инструмента к обрабатываемому материалу. Тонкие вакуумно–плазменные покрытия способны существенным образом изменять адгезионную активность контакта, влиять на размеры и место расположения очага износа и изменять условия изнашивания инструмента.

На рис 3.71 показан характер износа инструмента из быстрорежущей стали в зависимости от вида обрабатываемого материала при интенсивных режимах обработки.

При точении конструкционных железо-углеродистых сталей (сталь 45 и ШХ15) износ формируется в виде лунки на передней поверхности, при обработке аустенитной нержавеющей стали (12X18H10T) в виде лунки и площадки износа по задней поверхности, а при обработке жаропрочного сплава на никелевой основе ЭИ 437Б(ХН77ТЮР) в виде площадок износа на передней и задней поверхностях с опусканием вершины инструмента.

Ранее показано, что покрытие оказывает влияние на изменение контактных условий и стружкообразование только при обработке железо-углеродистых материалов, поэтому исследование условий формирования очага износа и механизмов изнашивания именно этих материалов имеет важное практическое значение.

Измерение места расположения и размеров очага износа на передней поверхности резцовой пластины производили при быстром выводе ее из зоны точения стали 45 на специальном устройстве, по схеме, приведенной на рис. 3.72.

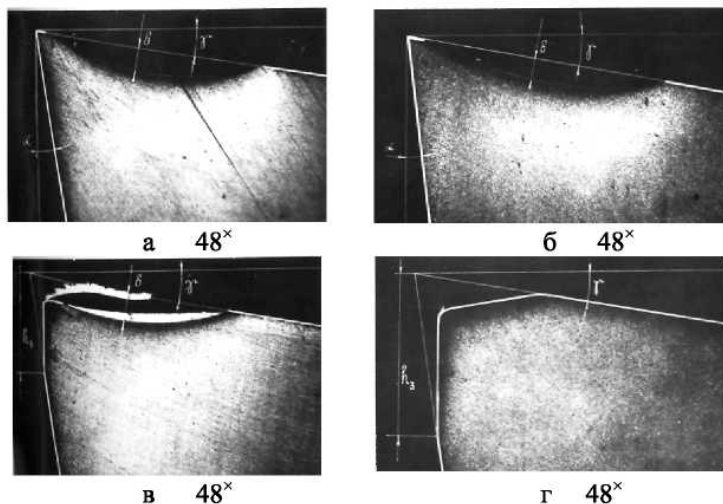


Рисунок 3.71 – Характер износа инструментов из быстрорежущей стали в зависимости от типа обрабатываемого материала  
 а – точение стали 45  $v=1,17$  м/с,  $s=0,26$  мм/об;  $T=1$  мин;  
 б – точение стали ШХ15  $v=0,75$  м/с,  $s=0,26$  мм/об;  $T=1$  мин;  
 в – точение стали 12Х18Н10Т  $v=0,58$  м/с,  $s=0,26$  мм/об;  $T=1$  мин;  
 г – точение сплава ЭИ 437Б  $v=0,15$  м/с,  $s=0,26$  мм/об;  $T=1$  мин.

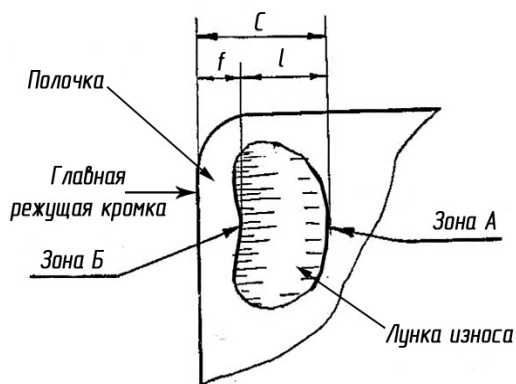


Рисунок 3.72 – Схема измерения места расположения и размеров очага износа на передней поверхности инструмента при точении стали 45  
 $C$  – длина контакта, мм,  $l$  – ширина лунки износа, мм,  $f$  – ширина полочки, мм.

Измеряли длину контакта –  $C$ , ширину лунки износа –  $l$  и ширину полочки –  $f$ . При рассмотрении лунки износа различают зону А – как место отрыва стружки от передней поверхности на выходе ее из лунки износа и зону Б – как место перехода полочки к началу лунки износа.

Формирование и изменение размеров очага износа необходимо рассматривать за определенный период времени, т.к. контактные характеристики и условия стружкообразования, измеренные в первые минуты резания острозаточенным инструментом (в период, когда лунка еще не сформирована) существенно отличаются от этих характеристик, когда инструмент приработан и находится в состоянии рабочего изнашивания.

На рис. 3.73 показано изменение параметров лунки и усадки стружки при точении стали 45 до полного теплового затупления резца.

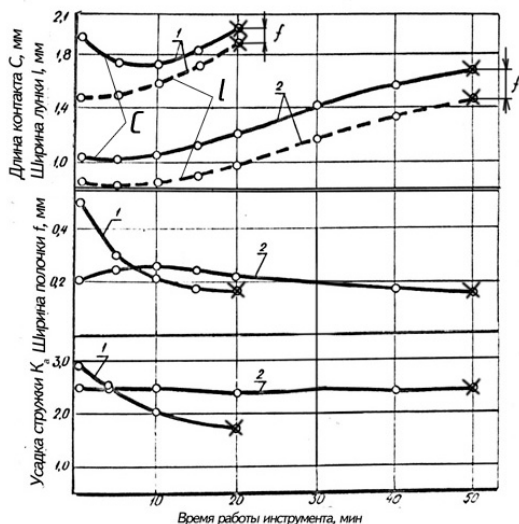


Рисунок 3.73 – Изменение параметров лунки и усадки стружки по времени при точении стали 45: 1 – P6M5, 2 – P6M5+TiN  
 $v = 0,73$  м/с,  $s = 0,43$  мм/об;  $t = 1,4$  мм, без СОТС;  
 x – время полного затупления резца (период стойкости –  $T$ , мин)

Видно, что длина контакта –  $C$  и ширина лунки –  $l$  у инструмента с покрытием остается меньше на протяжении всего периода стойкости –  $T$ . Значения ширины полочки –  $f$  и усадки стружки –  $K_a$  в первый момент времени больше у инструмента без покрытия, однако, с увеличением времени работы снижаются и после 5 минут, становятся меньше, чем у инструмента с покрытием. Усадка стружки и ширина полочки –  $f$  у инструмента с

покрытием сохраняется без изменений длительное время. В данных условиях течения период стойкости инструмента с покрытиями в 2,5 раза выше, чем без покрытия.

Для выяснения механизма повышения стойкости инструмента с покрытиями необходимо знать, в какой зоне А или Б, на выходе или входе стружки в лунку износа реализуются износостойкие свойства покрытия. На рис. 3.74 приведены результаты исследования роста ширины лунки износа и период стойкости для 4-х вариантов передней поверхности инструмента.

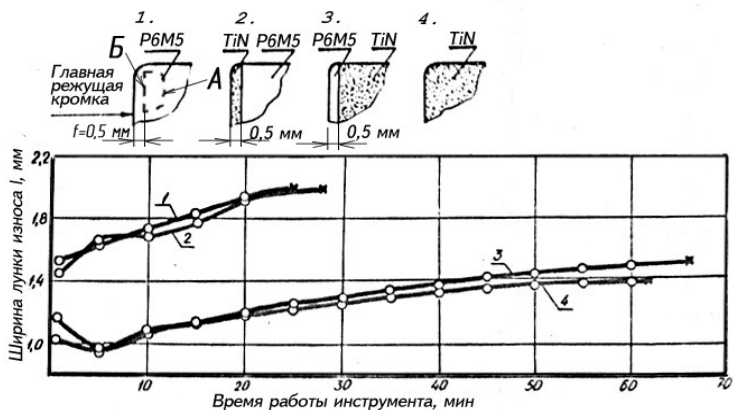


Рисунок 3.74 – Исследование влияния места нанесения износостойкого покрытия TiN на формирование размеров лунки износа и стойкость резцов при точении стали 45  
 $v = 0,67$  м/с,  $s = 0,43$  мм/об,  $t = 1,5$  мм, без СОТС  
 $x$  – время полного затупления инструмента.

1 – передняя поверхность без покрытия, 2 – у режущей кромки на месте полочки нанесена полоска шириной 0,5 мм покрытия TiN, 3 – на месте полочки отсутствует покрытие, а на всей передней поверхности покрытие имеется, 4 – вся передняя поверхность имеет покрытие.

Приведенные графики однозначно показывают, что роль покрытия реализуется в зоне А, в которой стружка выходит из лунки износа. Кривые расположены парами с одинаковыми контактными условиями в зоне А. Для данных режимов резания покрытие в зоне А в 1,5 раза уменьшает ширину лунки износа и увеличивает стойкость инструмента более 2-х раз. Однако, остается неясным, как покрытие толщиной всего ~5 мкм может сдерживать износ инструмента, на который с высоким давлением воздействует сходящая стружка. Рассмотрение лунки износа при быстром выводе резца из зоны резания показало, что условия контактирования сходящей стружки с лункой

износа принципиально отличаются. В лунке износа у инструмента с покрытием на участке, примыкающем к зоне А выхода стружки, образуется устойчивый объем заторможенного обрабатываемого материала, по которому стружка и скользит при выходе из лунки. Это явление наблюдается при обработке разных железоуглеродистых материалов (Стали 45, 30ХГСА, ШХ15СГ) в том числе и при точении с СОТС. рис. 3.75 –3.78.

В лунке износа у инструмента без покрытия наблюдается только островки наливов, меняющие свое расположение по всей площади. Различие в условиях контактирования стружки с поверхностью лунки в первую очередь обусловлено уровнем контактного давления, определяемого размерами ширины лунки –  $l$ . У инструментов с покрытием уровень среднего контактного давления  $q_n$  всегда выше из-за меньшей в 1,5 раза длины контакта –  $C$ .

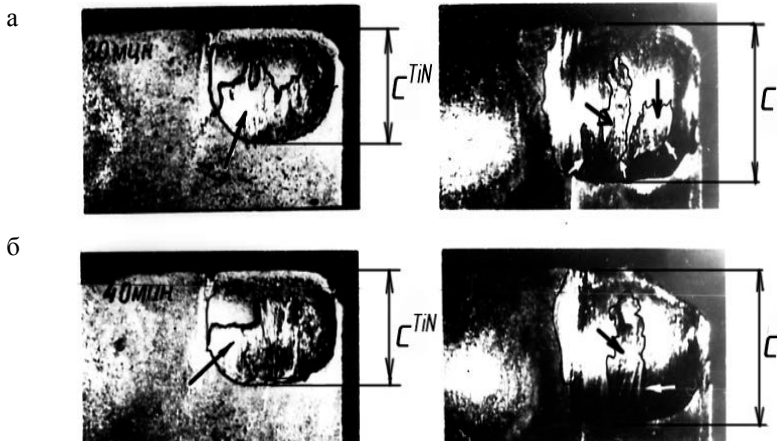


Рисунок 3.75 – Передняя поверхность инструмента при точении стали 45  
а – 30 мин. работы, б – 40 мин. работы.

Условия обработки:  $v = 0,73$  м/с,  $s = 0,43$  мм/об;  $t = 1,5$  мм

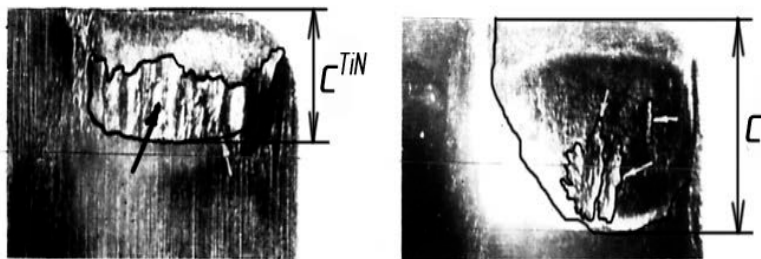


Рисунок 3.76 – Передняя поверхность инструмента при точении стали 30ХГСА.

Условия обработки:  $v = 0,47$  м/с,  $s = 0,43$  мм/об;  $t = 1,5$  мм,  $\tau = 30$  мин

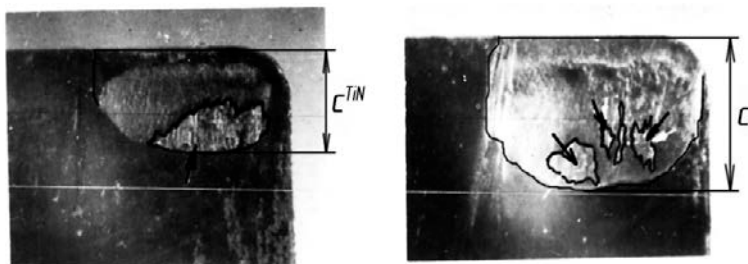


Рисунок 3.77 – Передняя поверхность инструмента при точении стали ШХ15СГ.

Условия обработки:  $v = 0,5$  м/с,  $s = 0,43$  мм/об;  $t = 1,5$  мм,  $\tau = 10$  мин

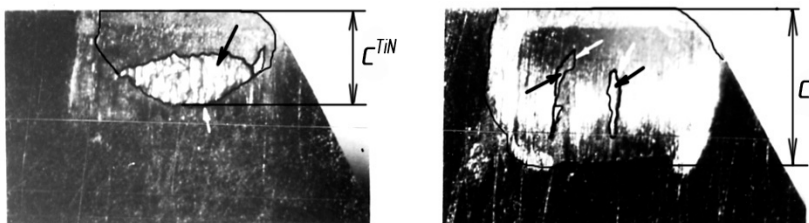


Рисунок 3.78 – Передняя поверхность инструмента при точении стали 45 с применением СОТС.

Условия обработки:  $v = 0,83$  м/с,  $s = 0,43$  мм/об;  $t = 1,5$  мм,  $\tau = 5$  мин

На рис. 3.79 приведена принципиальная схема износа инструмента с покрытием при точении железоуглеродистых материалов, на основании которой можно описать механизм повышения стойкости инструмента с покрытием следующим образом.

1. При первом контакте стружки ( $\tau \leq 0,5$  мин) с передней поверхностью, у инструмента с покрытием, за счет снижения адгезионного схватывания, уменьшается длина контакта –  $C$ , увеличивается угол условной плоскости сдвига  $\beta_1$  и в связи с этим снижается усадка стружки и сила стружкообразования  $R$ . Однако, средние контактные давления –  $q_n$  увеличиваются, т.к. сокращение площади контакта за счет уменьшения длины контакта происходит в большей степени, чем снижение составляющих силы резания  $P_1$  и  $P_2$ .

2. Через 0,5-2 мин. работы инструмента происходит прорыв (разрушение) покрытия в месте начала формирования лунки и стружка начинает контактировать с материалом инструмента. Однако, условия контактного трения в лунке в этом случае отличаются от условий контактирования стружки с инструментом без покрытия более высокими значениями средних контактных давлений  $q_n$ .

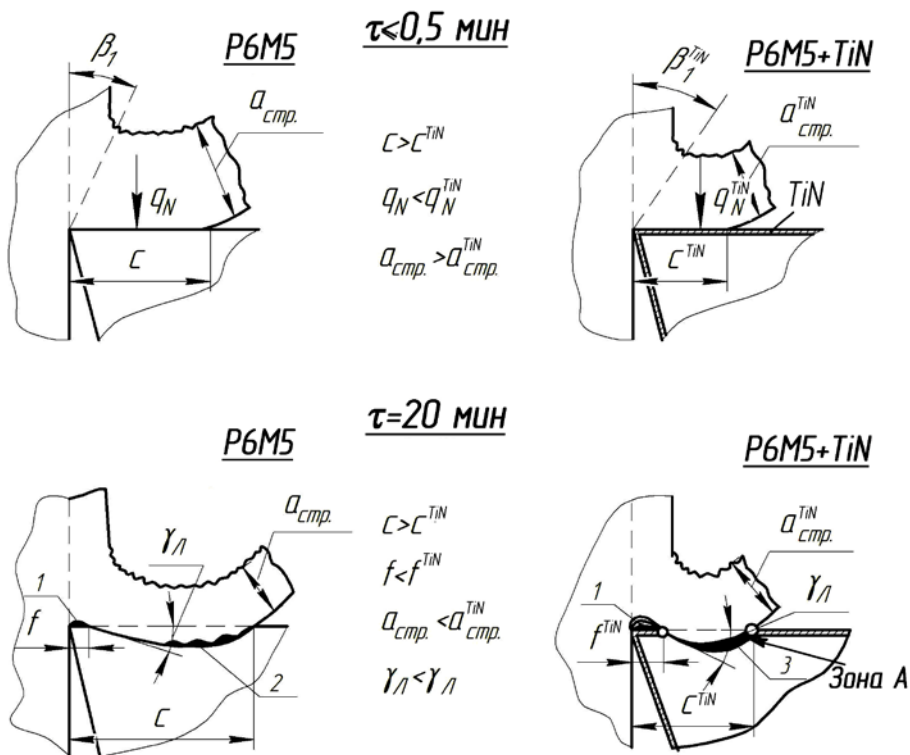
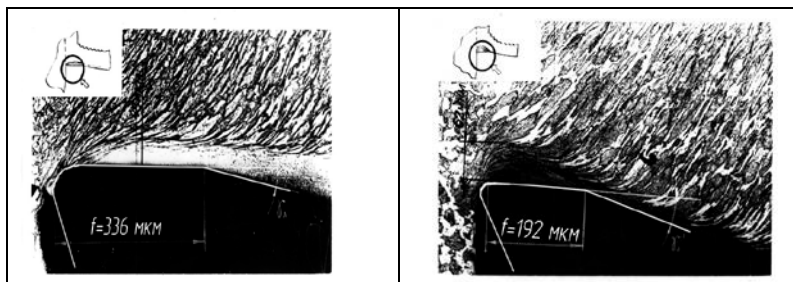


Рисунок 3.79 – Принципиальная схема изнашивания инструмента с покрытием при точении железоуглеродистых материалов

- 1 – застойная зона у режущей кромки;
- 2 – неустойчивые налипсы в лунке износа;
- 3 – заторможенный слой обрабатываемого материала

3. При повышении среднего контактного давления наблюдается полное затормаживания контактного слоя стружки (рис. 3.80), а граница, определяющая ее движение, поднимается выше гребешков микронеровностей инструментального материала, т.е. реализуется пластический сдвиг в материале стружки.

4. Образовавшийся заторможенный слой у инструмента с покрытием плотно прилегает к задней стороне лунки. В этом случае обеспечивается внутреннее трение в материале сходящей стружки.



а

б

Рисунок 3.80– Условия кинематического затормаживания (форма застойной зоны) обрабатываемого материала на полочке у вершины резца при точении стали 45: а – P6M5, б – P6M5+TiN. Условия обработки:

$v = 0,67$  м/с,  $s = 0,43$  мм/об;  $t = 1,4$  мм;  $\tau = 5$  мин, без СОТС

У инструмента без покрытия задняя стенка лунки свободна от заторможенного слоя, хотя на дне лунки возникают островковые налипы, которые меняют свою конфигурацию и место расположения во времени, подтверждая их неустойчивость.

Таким образом, **устойчивый заторможенный слой обрабатываемого материала, сформировавшийся у инструмента с покрытием, предохраняет заднюю стенку лунки от контакта со сходящей стружкой и отодвигает источники тепловыделения от ее поверхности.**

5. **Покрытие проявляет свои износостойкие свойства в зоне отрыва стружки от передней поверхности на выходе из лунки (Зона А), сдерживает рост ее ширины.** Это позволяет длительное время сохранять высокое нормальное давление стружки и обеспечить устойчивость заторможенных слоев на задней стороне лунки.

6. Возможность более длительное время сохранять меньшие размеры лунки позволяет обеспечивать такие условия обтекания стружкой вершины режущего клина, которые способствуют формированию наиболее рациональной формы застойной зоны на полочке у режущей кромки,

К сожалению, выше описанный механизм повышения стойкости инструментов с покрытиями практически не реализуется при резании труднообрабатываемых материалов, особенно инструментом из быстрорежущей стали. Покрытие разрушается в первый момент контакта со стружкой, не оказывая заметного влияния на повышение износостойкости. Разрушение покрытия связано со значительно более высокими (до 4–х раз и выше) по сравнению с железоуглеродистыми материалами контактными нагрузками и характерной для этих материалов неустойчивостью пластического течения в зонах контактного трения (рис. 3.81).



Рисунок 3.81 – Вид контактного взаимодействия стружки и передней поверхности инструмента при точении сплава ЭИ787.

Условия обработки:  $v = 0,033$  м/с;  $s = 0,3$  мм/об;  $t = 1,5$  мм.

Инструментальный материал – P12MФ5–МП

Износ на передней поверхности происходит без образования лунки и полочки у режущей кромки и устойчивых заторможенных зон, установленных для железоуглеродистых материалов.

При точении титановых, а также жаропрочных сплавов ЭИ787 и ЭИ437 (ХН77ТЮР) в широком диапазоне изменения режимов и условий резания инструментом из быстрорежущей стали с различными покрытиями существенного эффекта от применения покрытий не установлено.

### 3.5.5. Конструирование многослойных покрытий для режущих инструментов

Совершенствование современных составов и конструкций вакуумно-плазменных пленочных покрытий ведут путем разработки композиционных или многослойных покрытий с целью получения комплекса их характеристик, превышающих свойства однослойного покрытия.

На рис. 3.82 приведена принципиальная схема фрикционного узла при резании.

У покрытия имеется две контактные границы: со стружкой и с материалом инструмента. На границе I происходят процессы схватывания и износа с подвижной стружкой, а граница II является местом прочного закрепления покрытия на поверхности инструмента.

Если обрабатывается железоуглеродистый материал (сталь 45) инструментом из быстрорежущей стали, которая по химическому составу также является железоуглеродистым легированным материалом, то к покрытию одновременно предъявляются противоречивые требования.

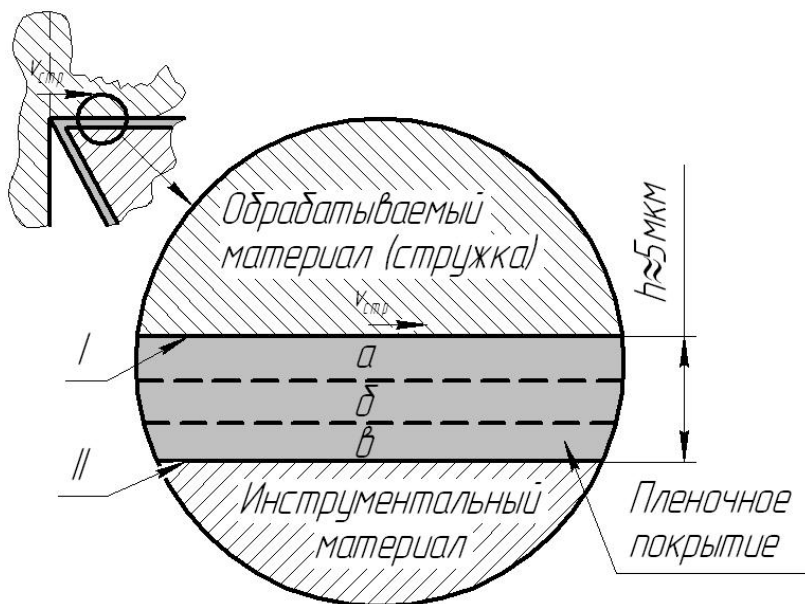


Рисунок 3.82 – Схема фрикционного узла при резании инструментом с покрытием:

I – граница контакта со стружкой (обрабатываемым материалом).

II – граница сцепления покрытия с инструментальным материалом

На границе со стружкой схватывание должно быть минимальным, а на границе с инструментальным материалом максимальным. Это техническое противоречие можно решить, создав покрытие с различным комплексом свойств на этих двух границах, либо путем чередования слоев – *многослойное покрытие*, либо постепенным изменением состава по толщине – *композиционное покрытие*.

К верхнему слою (а), контактирующему со стружкой, предъявляется требование минимальной адгезионной активности к обрабатываемому материалу, обеспечивающее минимальное схватывание. К нижнему слою (в), соединенному непосредственно с инструментальным материалом, предъявляются требования прочного сцепления. Слой (б) должен иметь высокий уровень износостойкости и прочности и надежно соединять слои (а) и (в). Естественно, слои (а) и (в) также должны обладать достаточной прочностью и износостойкостью.

### 3.5.6. Методы оценки основных эксплуатационных свойств покрытий для режущих инструментов

Среди многих видов покрытий тонкие вакуумно-плазменные износостойкие покрытия (пленки) занимают особое место. Эта особенность определяется их незначительной толщиной (не более 5 мкм), высокой микротвердостью, прочностью сцепления с подложкой, а также условиями эксплуатации на режущем инструменте – характеристиками трения в условиях схватывания с обрабатываемым материалом, износостойкостью и др.

#### 3.5.6.1 Определение толщины покрытия

Определение толщины покрытия возможно несколькими методами: путем прямого обмера размеров напыляемой поверхности перед и после нанесения покрытий, методом металлографических шлифов и целым рядом различных физических методов.

**В металлографическом методе** образцы или инструмент плотно прижимают напыленными поверхностями к другой поверхности с твердостью, равной твердости подложки (инструмента), и в плоскости перпендикулярной к поверхности напыления изготавливают металлографический шлиф. После его травления (для инструмента из быстрорежущей стали) в 4% растворе азотной кислоты в этиловом спирте износостойкий слой проявляется в виде светлой нетравящейся зоны (рис. 3.83), который измеряют на металлографическом микроскопе при увеличении  $\times 1000$ – $2000$ . Недостатком этого метода является необходимость разрушения изделия.

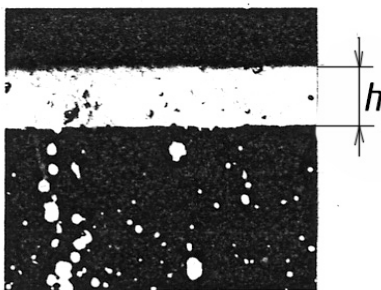


Рисунок 3.83 – Металлографический метод определения толщины износостойкого слоя ( $2000\times$ )

**Среди физических методов** наиболее распространенным является метод **рентгеноструктурного анализа**. Определение толщины покрытий этим методом основано на ослаблении интенсивности рентгеновского излучения, отраженного от поверхности основного материала инструмента на двух участках с покрытием и без него.

На заводах для определения толщины покрытия TiN используют прибор «Micro-DEEM» модели MP-700 (США). Принцип работы прибора следующий (рис. 3.84).

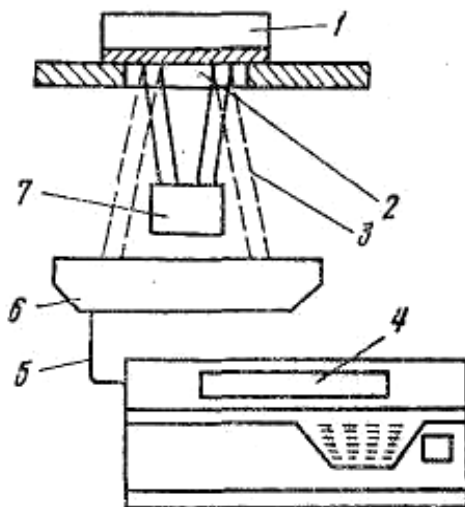


Рисунок 3.84 – Измерение толщины покрытия с помощью обратного бета-рассеяния на приборе «Micro-DEEM» модели MP-700  
1 – образец с покрытием; 2 – отверстие; 3 – бета-лучи; 4 – ЭВМ;  
5 – провод зонда; 6 – счетчик Гейгера – Мюллера;  
7 – источник бета-излучения

Бета-лучи, испускаемые радиоактивным источником 7, направляются на поверхность образца 1, на которую нанесено покрытие. Некоторые бета-лучи поглощаются образцом, а другие – 3 подвергаются обратному рассеянию или отражаются. Рассеянные бета-лучи обнаруживаются с помощью счетчика Гейгера – Мюллера 6 и передаются в виде электрических импульсов на ЭВМ прибора 4. Зависимость скорости обратного бета-рассеяния от толщины покрытия позволяет проводить непосредственное измерение толщины покрытия.

### **3.5.6.2 Определение микротвердости покрытий**

ГОСТ 9450–76 «Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников» устанавливает два метода испытаний: основной – по восстановленному отпечатку и дополнительный – по невосстановленному.

На отечественных приборах ПМТЗ и ПМТ5 можно корректно оценивать микротвердость покрытий с толщиной более 4 мкм, так как минимальная толщина покрытия должна превышать глубину отпечатка не менее чем в 10 раз. Поэтому, для оценки микротвердости тонких покрытий (пленок) необходимо использовать ультрамикротвердомер типа МИКРО–ДЮРОМАТ – 4000. На этом приборе возможно наносить микро и ультрамикротвердые отпечатки в диапазоне усилий от 0,0005 до 2 Н при использовании алмазного наконечника с формой рабочей части в виде бидицилиндра.

### **3.5.6.3. Определение прочности сцепления покрытия с подложкой (инструментальным материалом)**

В настоящее время наиболее принятым количественным методом определения прочности сцепления твердых тонких покрытий (пленок) с подложкой является метод царапания с переменной нормальной нагрузкой – Р (рис. 3.85).

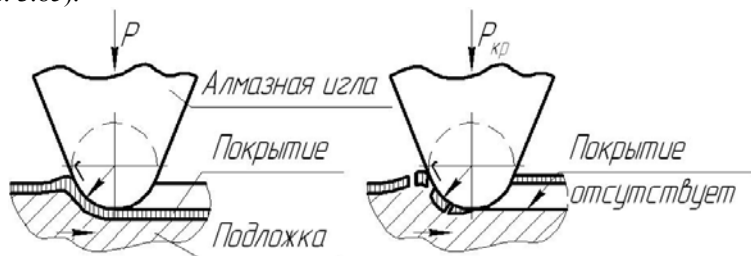


Рисунок 3.85 – Определение прочности сцепления покрытия с подложкой методом царапания с переменной нормальной нагрузкой – Р

Царапающее устройство снабжено алмазной иглой в форме конуса Роквелла с радиусом заточки  $r = 0,2$  мм. Во время движения (царапания) на алмазную иглу последовательно с шагом в 1 Н от 1 до 150 Н прикладывается нормальная нагрузка Р. С ростом нормальной нагрузки наступает момент, когда покрытие разрушается. **Нагрузка, при которой теряется сцепление покрытия с подложкой, называется критической – Р<sub>кр</sub>.** Величина критической нагрузки является критерием прочности сцепления покрытия с инструментальным материалом.

### **3.5.6.4. Определение адгезионных свойств покрытий к обрабатываемому материалу**

Считается, что общая сила трения, а, следовательно, и коэффициент трения складывается из двух составляющих: деформационной и адгезионной. Исходя из этого коэффициент трения равен:

$$f = f_{деф} + f_{адг}, \tag{3.36}$$

где  $f_{деф}$  – деформационная составляющая коэффициента трения;  $f_{адг}$  – адгезионная составляющая коэффициента трения.

Применяя метод определения тангенциальной прочности адгезионной связи полированных поверхностей под нормальной нагрузкой, считают, что деформационная составляющая бесконечно мала и ею можно пренебречь. Тогда при условии сжатия сферы двумя образцами (рис. 3.86) и ее повороте можно определить адгезионную составляющую коэффициента трения по формуле

$$f_{адг} = \frac{3 F_{экс} R_{экс}}{4 r_{л} N}, \quad (3.37)$$

где  $F_{экс}$  – экспериментально определяемое усилие для поворота индентора, Н;  $R_{экс}$  – радиус поворотного диска, в котором крепится образец со сферическими поверхностями, мм;  $r_{л}$  – радиус лунки от внедрения сферической поверхности образца, мм;  $N$  – нормальная нагрузка, Н.

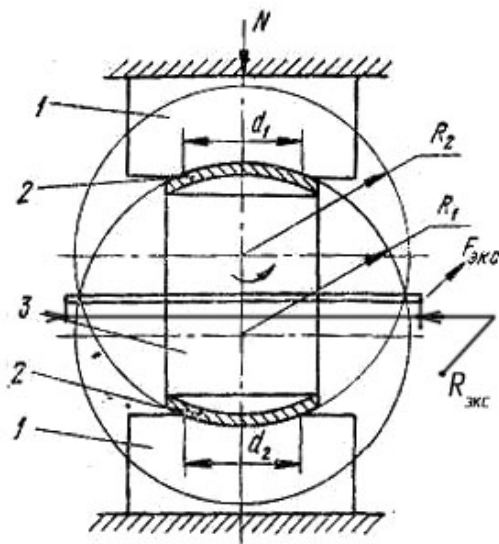


Рисунок 3.86 – Узел трения

1 – образцы из обрабатываемого материала; 2 – износостойкое покрытие; 3 – образец из инструментального материала (индентор);  $d_1$   $d_2$  – диаметры лунок вдавливания;  $R_1$ ,  $R_2$  – радиусы шарового индентора;  $F_{экс}$  – измеряемая сила трения

В предлагаемом методе адгезионная активность фрикционного контакта оценивается уровнем прироста поверхности фактического сдвига при его перемещении:

$$\Delta s = \Delta F_{\text{экс}}^{\text{пр}} / (s \tau_{\text{сд}}), \quad (3.38)$$

где  $\Delta F_{\text{экс}}^{\text{пр}}$  – прирост силы трения при постоянной для всех случаев величине угла поворота  $d\varphi_i$  индентора 2 (определяется экспериментально);  $\tau_{\text{сд}}$  – сопротивление обрабатываемого материала сдвигу.

$$\tau_{\text{сд}} = F_{\text{экс}}^{\text{пр}} / s, \quad (3.39)$$

$F_{\text{экс}}^{\text{пр}}$  – предельная сила трения, определяется экспериментально;  $s$  – площадь поверхности трения (общая поверхность сферических отпечатков на образцах) фрикционного контакта, рассчитывается по формуле:

$$s = s_1 + s_2, \quad (3.40)$$

$s_1, s_2$  – площади поверхности трения индентора с верхним и нижним образцами:

$$s_i = \pi D_i (D_i - \sqrt{D_i^2 - d_i^2}) / 2, \quad (3.41)$$

$D$  – диаметр шаровой поверхности индентора;  $d$  – диаметр отпечатка;  $i = 1, 2$ .

Для оценки коэффициента относительной адгезионной активности покрытия к обрабатываемому материалу по сравнению с адгезионной активностью подложки к обрабатываемому материалу эксперимент по оценке степени изменения силы трения (рис. 3.87) необходимо проводить дважды.

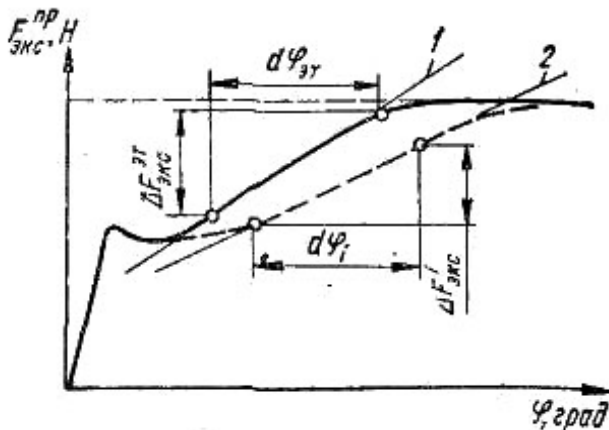


Рисунок 3.87 – Диаграммы силы трения для различных пар трения  
1 – Р6М5 – обрабатываемый материал; 2 – TiN – обрабатываемый материал

Первый раз записывают кривую роста нагрузки  $F_{экс}$  при вращении индентора без покрытия, а второй раз – с покрытием. Измеряя прирост силы трения  $F_{экс}$  на одинаковом угле поворота индентора  $d\varphi$ , а также диаметры шаровых поверхностей  $D_1$  и  $D_2$  и лунок  $d_1$  и  $d_2$ , рассчитывают коэффициент относительной адгезионной активности –  $K_{адз}$ .

$$K_{адз} = \frac{\Delta s_i}{\Delta s_{эт}}, \quad (3.42)$$

где  $s_i$ ,  $s_{эт}$  – адгезионная активность соответственно индентора с износостойкой пленкой и подложкой (быстрорежущей сталью) к обрабатываемому материалу.

Контактные поверхности образцов получают по методике изготовления металлографических шлифов. Перед экспериментом поверхности образцов тщательно обезжиривают четыреххлористым углеродом и протирают пудрой из активированного угля.

### 3.5.6.5. Оценка износостойкости покрытия в условиях резания

На рис. 3.88 показана схема испытаний на износостойкость инструментального материала 3 или покрытия 4 с различной адгезионной активностью при трении стружкой 5 в условиях постоянства формы и размера застойной зоны 2. Измерение износа производят профилографированием на профилографе – профилометре модели ВЭИ–201 «Калибр» при вертикальном увеличении 1000 х и горизонтальном 80 х.

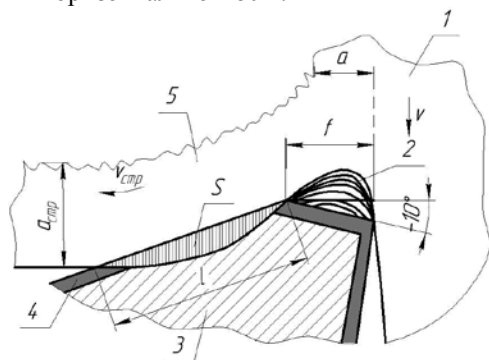


Рисунок 3.88 – Схема испытаний покрытий на износостойкость при резании 1 – обрабатываемый материал; 2 – застойная зона; 3 – резцовая пластина из быстрорежущей стали; 4 – покрытие; 5 – стружка, S – площадь очага износа

Сохранение постоянства формы и размеров застойной зоны - 2 для инструментальных материалов с различной адгезионной активностью

достигается путем создания на передней поверхности отрицательной фаски -  $f = (1,5 - 2)a$ . Это является важнейшим условием повышения точности определения способности пленки противостоять износу при трении стружкой.

Для определения износостойкости покрытий разных составов, нанесенных на быстрорежущую подложку, рекомендуются следующие условия испытаний: точение стали 45, скорость -  $v=0,5$  м/с, глубина резания -  $t=1,5$  мм, подача -  $s=0,43$  мм/об ( $a = 0,3$  мм при  $\varphi = 45^\circ$ ), угол фаски -  $(-10^\circ)$ , величина фаски  $f = 0,5$  мм, время испытаний - 10 мин, без СОЖ. Площадь очага износа -  $S$  определяют планиметрированием.

Относительную интенсивность износа  $J$  при резании Стали 45 определяют отношением  $J = \frac{S_{покр}}{S_{P6M5}}$ , где  $S_{покр}$  - площадь очага износа инструмента с покрытием,  $S_{P6M5}$  - площадь очага износа инструмента из быстрорежущей стали P6M5 без покрытия.

### 3.5.7. Создание многослойного покрытия для инструмента из быстрорежущей стали при обработке железо-углеродистого материала Сталь 45

Возможности вакуумно-плазменных технологий осаждения различных покрытий очень широки, поэтому целесообразно определить важнейшие эксплуатационные свойства карбидных и нитридных монопленок, нанесенных на инструментальную подложку из быстрорежущей стали P6M5, на основании которых можно конструировать многослойные или композиционные покрытия.

Свойства нитридных и карбидных покрытий переходных металлов IV-VI групп, измеренные по описанным выше методикам, приведены в таблицах 3.1 и 3.2. Покрытия наносили в вакуумно-плазменной установке «Булат-3У» толщиной  $h=5$  мкм.

Анализ таблиц 3.5 и 3.6 показывает, что нитриды переходных металлов в большей мере, чем карбиды отвечают требованиям, предъявляемым к свойствам покрытий по следующим причинам:

1. Из-за более высокой микротвердости карбидных покрытий они проявляют большую склонность к разрушению, чем нитридные при пластическом деформировании инструментальной подложки в условиях измерения ее твердости по шкале HRC.

2. Нитридные пленки имеют более высокую прочность сцепления с инструментальной основой по сравнению с карбидами. А нитрид циркония  $ZrN$  из всех исследованных соединений обладает наиболее высокой критической нагрузкой разрушения,  $P_{кр}=130$  Н.

Таблица 3.5 – Свойства нитридных покрытий (на подложке P6M5)

№ п/п	Тип покрытия	Микротвердость $H_{\mu}$ , Н/мм <sup>2</sup>	Прочность сцепления с инструментальным материалом, $P_{кр}$ , Н	Коэффициент адгезии с обрабатываемым материалом Сталь 45, $K_{адг}$	Относительная интенсивность износа, $J$ при резании Стали 45
1	P6M5 без покрытия	9360	–	1,00	1,000
2	TiN	21750	85	0,33	0,305
3	ZrN	18490	130	0,71	0,309
4	HfN	25000	110	0,54	0,552
5	VN	28140	105	0,37	0,674
6	NbN	31460	70	0,06	0,333
7	CrN	26600	110	0,51	0,536
8	Mo <sub>2</sub> N	27400	80	0,82	1,003

Таблица 3.6 – Свойства карбидных покрытий (на подложке P6M5)

№ п/п	Тип покрытия	Микротвердость $H_{\mu}$ , Н/мм <sup>2</sup>	Прочность сцепления с инструментальным материалом, $P_{кр}$ , Н	Коэффициент адгезии с обрабатываемым материалом Сталь 45, $K_{адг}$	Относительная интенсивность износа, $J$ при резании Стали 45
1	P6M5 без покрытия	9360	–	1,00	1,000
2	TiC	23860	55	0,58	0,365
3	ZrC	33000	80	2,46	0,375
4	HfC	28650	80	2,14	0,268
5	VC	35230	70	1,05	0,275
6	NbC	37800	55	0,25	0,249
7	CrC	19250	70	0,52	0,622
8	Mo <sub>2</sub> C	30380	60	0,04	0,781

3. Более низкое схватывание  $K'_{адз}$  по отношению к Стали 45 также приходится в основном на нитриды. Аномально низкое схватывание со Сталью 45 получено при трении нитридом ниобия NbN и карбидом молибдена Mo<sub>2</sub>C.

4. Однако, существенного повышения износостойкости в процессе резания инструментом с покрытием из карбида молибдена не получено вследствие его низкой термической устойчивости.

Высокими свойствами по износостойкости обладают покрытия TiN, ZrN и NbN, поэтому на их основе были нанесены и испытаны различные многокомпонентные покрытия.

В табл. 3.7 представлены результаты испытаний на износостойкость инструмента с многокомпонентными покрытиями. Максимальной износостойкостью при резании стали 45 обладает покрытие ZrN-TiN-NbN, у которого нижний слой выполнен из нитрида циркония, обладающего высокой прочностью сцепления с инструментом, а верхний слой имеет самое низкое схватывание с обрабатываемым материалом, состоит из нитрида ниобия. Лучший результат показывает покрытие, если между нижним слоем ZrN и верхним – NbN расположен нитрид титана TiN, характеризующийся полной взаимной растворимостью с этими нитридами.

Таблица 3.7 – Результаты сравнительных испытаний на износостойкость инструмента с различными покрытиями

№№ п/п	Тип покрытия	Относительная интенсивность изнашивания, $J=S/S_{P6M5}$
1	P6M5 (без покрытия)	1,000
2	TiN	0,305
3	(Ti, Nb)N - композит	0,315
4	NbN-TiN	0,368
5	TiN-NbN	0,278
6	ZrN-NbN	0,312
7	ZrN-TiN-NbN	0,241

Получено повышение износостойкости инструмента с трехслойным покрытием более 4 раз по сравнению с инструментом без покрытия.

В табл. 3.8 и 3.9 приведены результаты промышленных стойкостных испытаний метчиков при нарезании резьбы в стали 45.

Условия испытаний:

1) испытания выполнены на вертикально-сверлильном станке модели 2A125;

Таблица 3.8 – Результаты испытаний метчиков М12 при  $n_1 = 680$  об/мин

Тип покрытия	Количество обработанных отверстий	Коэффициент повышения стойкости
Р6М5 без покрытия	215	1,0
TiN	574	2,7
ZrN-TiN-NbN	976	4,5

Таблица 3.9 – Результаты испытаний метчиков М12 при  $n_2 = 960$  об/мин

Тип покрытия	Количество обработанных отверстий	Коэффициент повышения стойкости
Р6М5 без покрытия	22	1,0
ZrN	75	3,4
TiN	126	5,7
ZrN-TiN-NbN	215	9,8

2) обрабатываемый материал – сталь 45 твердостью HB210;

3) диаметр отверстий 10,2 мм, глубина резьбы 15 мм, нарезание резьбы М12 на проход;

4) критерий износа – заедание метчика и остановка шпинделя;

5) частота вращения шпинделя:  $n_1 = 680$  об/м (табл. 3.8) и  $n_2 = 960$  об/мин (табл. 3.9);

5) СОТС не применяли.

Анализ полученных результатов показал, что метчики с покрытием ZrN-TiN-NbN показали значительно большее повышение стойкости, чем инструменты с однослойными покрытиями ZrN и TiN.

Промышленные испытания сверл, долбяков, а также холодно- и горячевысадочных пуансонов с многослойным покрытием ZrN-TiN-NbN при обработке изделий из железоуглеродистых материалов показали повышение стойкости в 1,5 и выше раз по сравнению с однослойным покрытием из нитрида титана – TiN и многократное повышение стойкости по сравнению с инструментом без покрытия.

### **3.6 Упрочнение режущей части инструмента путем интегрированного электроэрозионного легирования**

#### **3.6.1 Современное состояние теории и практики технологии электроэрозионного легирования металлорежущего инструмента**

Метод *электроэрозионного легирования* (ЭЭЛ) был разработан Б. Р. Лазаренко и Н. И. Лазаренко в 1943 году одновременно с методом размерной электроэрозионной обработки [36].

Процесс ЭЭЛ начинается со сближения электрода-инструмента с деталью и при расстоянии между ними, равном или меньше пробивного, начинается развитие импульсного разряда, который завершается при контакте электродов. Согласно [59] модель ЭЭЛ представляется следующим образом (рис. 2.1).

При сближении электродов напряженность «электрического поля» увеличивается и при некотором расстоянии между электродами она становится достаточной для возникновения электрического разряда, так называемой - сквозной проводимости. Через возникающий канал сквозной проводимости пучок электронов ударяется о твердую металлическую поверхность анода – электрода из легирующего материала (рис. 3.89,а). Энергия движения остановленных электронов выделяется в поверхностных слоях анода. В связи с тем, что в данный момент система скачкообразно освобождает накопленную энергию, плотность тока значительно превосходит критические значения. В результате этого от анода отделяется капля расплавленного металла, которая движется к катоду, опережая движущийся анод (рис. 3.89, б).

В процессе отделения от анода (положительный полюс источника тока) летящая капля успевает нагреться до высокой температуры, закипает или «взрывается». Цепь тока прерывается, сжимающие усилия электромагнитного поля исчезают и поэтому образовавшиеся частицы летят широким фронтом (рис. 4.1 в). Так как перегретая капля и частицы находились в соприкосновении с газом (окружающая среда), то по составу и свойствам они могут отличаться от исходного материала анода.

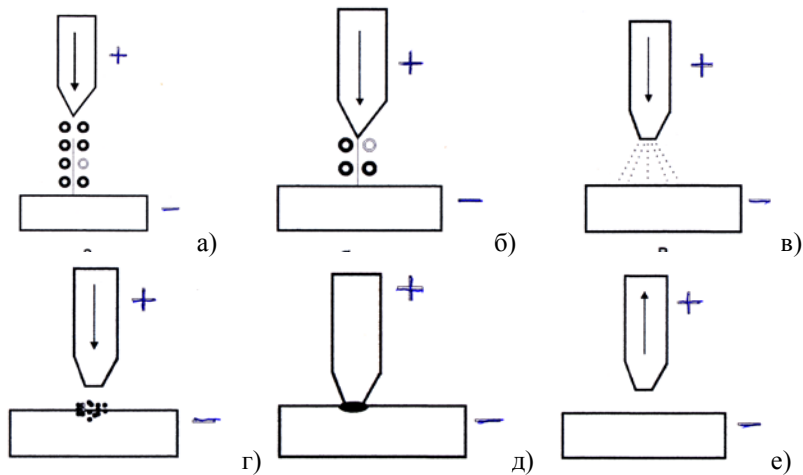


Рисунок 3.89 - Модель процесса ЭЭЛ

Расплавленные частицы, достигнув катода, свариваются с ним и частично внедряются в его поверхность (рис. 3.89, г). Вслед за частицами движется электрод, включенный в систему, успевшую накопить энергию. Через раскаленные частицы, лежащие на катоде, проходит второй импульс тока, сопровождающийся механическим ударом движущегося электрода (анода). На следующем этапе при механическом контакте электродов частицы свариваются между собой, и прогревается тонкий слой поверхности катода. При этом помимо диффузионного массопереноса под действием электрического тока в теле катода происходят химические реакции между наносимыми частицами и материалом катода. Механический удар электрода по раскаленной массе материалов «проковывает» полученное покрытие (рис. 3.89, д), что значительно увеличивает его однородность, плотность и твердость. Далее анод движется вверх, а на поверхности катода остается плотно соединенный с ним слой материала анода (рис. 3.89, е).

Таким образом, при сближении электродов между ними происходит электрический разряд, мгновенный разогрев межэлектродного пространства, развитие плазменной стадии разряда, при которой возможно существование вещества в ионизированном состоянии. Частицы материала, выброшенного с анода, ударяются о поверхность катода и прикрепляются к нему. В результате деформации расплавленного металла и действия электродинамических сил, возникающих в микрованне, на поверхности катода образуется лунка. Размер лунки и количество перенесенного материала зависят от электроэрозионной устойчивости материала электрода и энергии импульса. Материал микрованны и поступающие частицы анода образуют слой покрытия.

Несмотря на кратковременность действия единичных импульсов, общую невысокую температуру катода, сверхвысокую скорость охлаждения поверхностного слоя, в поверхностных слоях катода могут происходить и диффузионные процессы. Диффузионный слой возникает в результате сверхскоростного нагрева, высокого давления, развиваемого в канале разряда в точке его возникновения и многократных униполярного и импульсного действия электрического поля весьма высокой напряженности [60]. Кроме того, материал микрованны вступает во взаимодействие и с элементами окружающей среды. Поэтому состав слоя и его физико-химические свойства часто существенно отличаются от свойств легирующего и легируемого материалов [61].

Одним из наиболее важных следствий искрового разряда является разрушение электродов, интенсивность и характер которого во многом определяют толщину и качество получаемого на катоде слоя. Для большинства материалов толщина формируемого на катоде слоя ограничена. Утверждается [59], что в процессе ЭЭЛ с течением времени замедляется и прекращается оседание материала анода, а не эрозия и выброс его. Это связывается с образованием окислов и нитридов в слое, которые

препятствуют взаимодействию вновь поступающих на катод порций материала анода, с ранее нанесенными, и приводит к охрупчиванию и разрушению сформированного слоя. Иногда ограничение толщины формируемого слоя связывается [62] с его охрупчиванием за счет образования мелкокристаллической структуры под действием импульсных разрядов. Из анализа данных измерения привеса и остаточных напряжений следует, что с ростом удельной длительности легирования уровень остаточных напряжений в формируемых слоях вначале растет до определенной величины, а затем уменьшается. С определенного момента, хотя процессы переноса и роста покрытия на катоде еще продолжаются, но поверхностные слои уже охрупчиваются за счет образования мелкокристаллической структуры и возникновения хрупких фаз при взаимодействии материала электрода с окружающей средой. При этом появляющиеся микротрещины способствуют разрушению части сформированного покрытия и релаксации остаточных напряжений [59]. Наличие некоторой толщины формируемого слоя рассматривается как следствие исчерпания энергоемкости металла при многократной деформации в контакте с поверхностно-активным расплавом, оказывающим охрупчивающее действие. Динамика формирования поверхностных слоев характеризуется тем, что интенсивность переноса максимальна в первые минуты процесса, далее она уменьшается.

В конечном итоге при определенных значениях энергии разряда перенос сменяется эрозией уже нанесенного слоя, и привес становится отрицательным. Таким образом, физико-химическая природа структурообразования поверхностного слоя при ЭЭЛ обуславливает относительно большие трудности при выборе технологических параметров процесса. Вместе с тем, метод ЭЭЛ является одним из наиболее простых и доступных с технологической точки зрения способов упрочнения рабочих поверхностей режущих инструментов. Среди его достоинств, имеют место такие, как локальность, малый расход энергии, отсутствие объемного нагрева материала, простота автоматизации, удовлетворительная «встраиваемости» (совмещения операций) в технологический процесс изготовления инструмента с целью увеличения его твердости, износостойкости и снижения схватываемости (адгезии) с обрабатываемым материалом при резании и; соответственно, к практическому отсутствию наростообразования за счет формирования действием высоких температур и давлений слоя с особыми физико механическими свойствами (рис. 3.90). По интенсивности воздействия на поверхностный слой лезвия инструмента ЭЭЛ значительно отличается от перечисленных выше процессов (давление ударной волны 0,1 Па, температура 5 - 40 x 10<sup>3</sup> °C). Высокая скорость теплоотвода приводит к тому, что в пределах толщины слоя порядка нескольких микрометров температура быстро падает до температур плавления и соответствующих фазовых превращений.

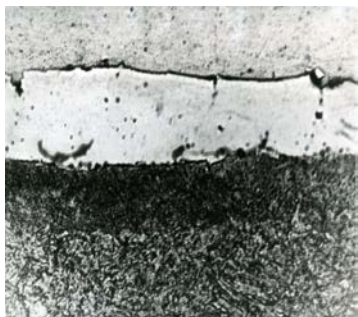


Рисунок 3.90 – Структура поверхностного слоя стали Р6М5 после ЭЭЛ твердым сплавом Т15К6

В связи с этим кристаллизация, фазовые превращения, диффузия и химическое взаимодействие, сопровождающее процесс ЭЭЛ, приводят к образованию крайне неравновесных структур с очень мелким зерном, высокой гетерогенностью по составу, структуре и свойствам. Твердость такого слоя, как правило, может существенно превосходить твердости материалов электродов. В нем действуют напряжения, превосходящие внутренние напряжения в электродных материалах анода и катода [59].

Общий слой ЭЭЛ имеет две зоны: верхний белый не травящийся, кажущийся однородным слой и нижний переходной слой с переменной концентрацией диффузионного характера. В большинстве случаев диффузионный слой по глубине превышает верхний белый, а глубина проникновения элементов анода в катод может составлять от нескольких до ста микрометров. Кроме этого, в зависимости от условий ЭЭЛ может образовываться и третья (переходная) зона - зона термического влияния (ЗТВ), являющийся зоной отпуска (зоной пониженной твердости). Глубина этой зоны зависит от энергии разряда.

В настоящее время метод ЭЭЛ нашел достаточно широкое применение для повышения износостойкости металлорежущего и штампового инструмента [59, 60, 61-72].

Различают два направления в ЭЭЛ: чистовое и грубое. При чистовом на катоде (детали) формируются относительно тонкие до 0,1 мм и качественные слои с высотой неровностей профиля покрытия  $R_z$  не более 40 мкм, при грубом толщина формируемого слоя может достигать 0,15–0,2 мм и более с  $R_z > 80$  мкм. Хотя традиционно различают установки для чистового и грубого легирования, существует ряд установок, которые могут применяться как для первого, так и для второго случаев, например «Элитрон-52» (рис. 3.91).

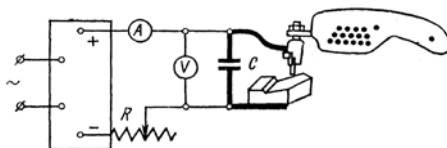
Грубое легирование используют для упрочнения тех поверхностей, к шероховатости которых не предъявляются высокие требования, с толщиной легированного слоя более 100 мкм. Это достаточно большая номенклатура деталей прокатного производства, работающих в условиях интенсивного изнашивания, гибочные штампы и т.п.



а -



б-



в

Рисунок 3.91 – Установка «Элитрон-52А», предназначенная для ЭЭЛ (а), переносная установка ЭИЛ – 8А (б) и их принципиальная электрическая схема (в)

В инструментальном производстве наиболее широко используются стационарные, например «ЭИЛ – 8», и переносные установки с ручным вибратором моделей; «ЭИЛ – 8А» (рис. 3.91, б); «Элитрон – 22А»; «УЭЛ – 4М» и др., которые незначительно отличаются конструктивным исполнением и практически не отличаются диапазоном используемых режимов работы. Установки компактны, малогабаритны, удобны в транспортировке и приспособлены для работы практически в любых производственных условиях.

При нанесении износостойких покрытий методом ЭЭЛ (однослойные покрытия) в качестве материалов электродов применяются преимущественно твердые сплавы (ВК8, ВК6М, Т15К6), графит, хром, молибден, вольфрам, обеспечивающих наиболее стабильные результаты на всех режимах легирования по массопереносу и сравнительно низкую шероховатость поверхности.. Электроды изготавливаются в виде цилиндров посредством вытягивания (экстрагирования), после чего шлифуются. Чаще всего используются электроды диаметром 0,8-1,0 мм, но возможно использование электродов диаметром 0,5-2,0 мм. Длина электрода 25-45 мм.

Для обеспечения качественного покрытия принципиальным является правильный выбор рационального для принятых условий времени легирования. Длительность легирования на одном режиме практически не влияет на показатель шероховатости, но определяет количество перенесенного материала с анода на катод, сплошность и толщину покрытия.

С увеличением длительности ЭЭЛ возрастает количество перенесенного материала с анода на катод, увеличиваются сплошность и толщина покрытия.

При ЭЭЛ предпочтение следует отдавать непрерывному легированию, обеспечивающему по сравнению с циклическим большей перенос вещества и, соответственно, толщину формируемого слоя.

Рациональным режимом для большинства использованных твердых износостойких материалов является режим, когда ток короткого замыкания  $J_{к.з} = 2,1A$ , напряжение холостого хода  $U_{х.х} = 68,7В$  при ёмкости накопительного конденсатора 300 мкФ, обеспечивающий в сочетании с большой толщиной белого слоя (25-30 мкм) относительно высокую микротвёрдость как белого слоя ( $H_{\mu} = 7500-12000$  МПа), так и ЗТВ ( $H_{\mu} = 400-5500$  МПа). Рациональное время легирования составляет 1-2 мин.. Результаты металлографических исследований состояния поверхностного слоя стали Р6М5 после ЭЭЛ износостойкими материалами представлены в табл. 3.10.

Таблица 3.10 - Результаты металлографических исследований состояния поверхностного слоя стали Р6М5 после ЭЭЛ износостойкими материалами

Материал электрода	Толщина, мкм		Характеристика слоя (режим, среда легирования, особенности структуры)
	Микротвёрдость, МПа		
	подслоя	белого слоя	
хром	<u>15</u> 7850	<u>20</u> до 8000	300 мкФ, воздух, слой равномерный
твёрдый сплав ВК8	<u>10</u> 7850	<u>25</u> 7500	300 мкФ, воздух, в структуре слоя светлые, не травящиеся участки ( $H_{\mu} = 6700, 7500, 8000$ МПа) и поля с коричневым оттенком ( $H_{\mu} \leq 7000$ МПа). Присутствуют включения с $H_{\mu} \cong 15000$
твёрдый сплав Т15К6	<u>10</u> 8000	<u>25</u> 6000	300 мкФ, воздух, участки типа эвтектики $H_{\mu} = 6000-6700$ МПа. Присутствуют включения с $H_{\mu} \cong 15000$
графит ЭГ - 4	<u>15</u> 9000	<u>20</u> 12000	20 мкФ, воздух, слой равномерный, сплошность высокая

Производственные испытания инструментов с износостойкими покрытиями, нанесенными методом ЭЭЛ показали, стабильное повышение их стойкости по сравнению с инструментами без покрытий. Испытанию подвергались шестизубые концевые фрезы Ø 36 мм из материала Р6М5 при черновом фрезеровании на копировально-фрезерном станке 6А445 пазов в дисках (материал 07Х16Н6, скорость резания  $V = 90$  об/мин, подача  $S = 31,5$

м/мин, глубина фрезерования  $t = 30$  мм). Обработка производилась с охлаждением эмульсией. ЭЭЛ подвергались задние поверхности зубьев по торцу (ширина полоски упрочнения 2-3 мм) и задние поверхности зубьев цилиндрической части фрезы (ширина упрочнения составляла 3 – 4 мм). Упрочняющими материалами служили твердые сплавы ВК8, Т15К6, хром и графит марки ЭГ-4. Твердость режущей части фрезы после легирования составляла 62 HRC. Результаты испытаний представлены в табл. 3.11.

Таблица 4.5 – Стойкость концевых фрез Ø 36 мм из быстрорежущей стали Р6М5, упрочненных методом ЭЭЛ, при обработке деталей из стали 07Х16Н6.

Материал электрода	Стойкость инструмента, мин	Коэффициент увеличения стойкости, раз
Без упрочнения	360	1,0
Хром	430	1,19
Хром	470	1,30
Хром	430	1,19
ВК8	510	1,41
ВК8	510	1,41
ВК8	540	1,50
Т15К6	540	1,50
Т15К6	540	1,50
Т15К6	612	1,70
ЭГ-4	790	2,19
ЭГ-4	800	2,22
ЭГ-4	780	2,16

Результаты показали, что лучшей износостойкостью при обработке стали 07Х16Н6 обладают фрезы, упрочненные углеродом. При этом стойкость фрез составила 780-800 мин против 360 мин стойкости фрезы без упрочнения.

### **3.6.2. Интегрированные технологии электроэрозионного легирования**

К интегрированным (комбинированным) технологиям ЭЭЛ относятся:

- технологии нанесения комбинированных «двухслойных» и квазимногослойных покрытий (КЭП), состоящих из твердых износостойких и мягких антифрикционных материалов и нанесенных в различной последовательности;
- нанесение износостойких композиционных покрытий электродами, изготовленными с помощью порошковой металлургии и представляющими композицию из нескольких различных металлов;
- технологии, сочетающие ЭЭЛ с другими способами улучшения поверхностных свойств изделий.

**3.6.2.1. Интегрированные технологии нанесения двухслойных и квазимногослойных электроэрозионных покрытий**

Процесс нанесения КЭП имеет две стадии: сначала на упрочняемую поверхность на «мягких» режимах ( $J_{кз} = 0,5...0,6$  А;  $U_{xx} = 38,5$  В;  $C = 20$  мкФ) наносят промежуточное технологическое покрытие, состоящее из металлов, выбранных из группы мягких, антифрикционных (In, Cd, Sn, Pb, Cu), а затем, на «средних» режимах ( $J_{кз} = 2,0...2,2$  А;  $U_{xx} = 68,7$  В;  $C = 300$  мкФ) наносится основное покрытие, выбранное из группы износостойких тугоплавких металлов (Ti, V, W) и их карбидов. Эта технология позволяет не только существенно уменьшить шероховатость упрочненной поверхности (табл. 3.12), но и обеспечить достаточно высокую микротвердость (табл. 3.13).

Таблица 3.12 - Влияние КЭП на шероховатость поверхности стали Р6М5

Материал покрытия	Режим упрочнения	Шероховатость поверхности Ra, мкм
Без покрытия	–	0,25
ВК8	5	3,84
T15K6	5	4,78
Cr	5	3,39
ВК8 + In	5 + 1	3,16
T15K6 + In	5 + 1	4,08
Cr + In	5 + 1	2,87
In + ВК8	1 + 5	0,57
In + T15K6	1 + 5	0,95
In + Cr	1 + 5	0,87

Таблица 3.13 - Результаты металлографических исследований КЭП на стали Р6М5

Материал покрытия	Толщина, мкм		Микротвердость, $H_{\mu}$ , МПа		
	слоя	переходной зоны	слоя	переходной зоны	основы
In + ВК8	20	40	6400, 6400	7040, 8900, 8300	9850
In + T15K6	30	40	7800, 8300	8300, 8300, 8300	То же
In + Cr	20	30	5700, 7450	7850, 8000	То же

**3.6.2.2. Интегрированные технологии нанесения композиционных электроэрозионных покрытий**

Износостойкие композиционные покрытия, наносимые рабочие поверхности режущих инструментов методом ЭЭЛ позволяют существенно повысить их эксплуатационные характеристики [62]. Эти покрытия наносятся с использованием электродов, изготовленных с помощью порошковой металлургии и представляющими композицию из нескольких различных металлов и химических элементов. В настоящее время наибольшую популярность получила тонкодисперсная смесь 1М (70% Ni, 20% Cr, 5% Si, 5% В) и ВК6.

Смесь 1М готовилась из тонкодисперсных порошков Ni, Cr, Si, В с размерами частиц не более 40 мкм. Порошки просушивались в сушильных шкафах при 150 - 200 °С, просеивались через сито 0075, загружалось необходимое количество их согласно рецептуре в специальный смеситель, и производилось механическое смешивание в течение 24 ч.

Для приготовления смеси ВК6 использовалась готовая твердосплавная смесь типа ВК6, она просушивалась в вакууме с разрежением не менее  $1 \cdot 10^{-1}$  мм. рт. ст. при 150 °С, затем просеивалась через сито 0075. После того, как твердосплавная и самофлюсующая смеси готовы, их загружали в смеситель и подвергали совместному сухому механическому смешиванию в течение 24 ч в следующих соотношениях: 100%1М; 50%ВК6 + 50%1М; 60%ВК6 + 40%1М; 70%ВК6 + 30%1М; 80%ВК6 + 20%1М; 90%ВК6 + 10%1М; 100%ВК6.

В табл. 3.14 представлены результаты металлографических исследований этих покрытий.

Таблица 3.14 - Результаты металлографических исследований образцов из стали Р6М5 с композиционными электроэрозионными покрытиями

Материал покрытия	Толщина слоя, мкм	Микротвердость, $H_{\mu}$ , МПа	Сплошность, %
100%1М	50...75	11500	90
50%ВК6 + 50%1М	40...50	12000	70
60%ВК6 + 40%1М	30...40	12500	75
70%ВК6 + 30%1М	25...35	13000	80
80%ВК6 + 20%1М	25...35	13500	80
90%ВК6 + 10%1М	20...30	14200	85
In + 100% 1М	10...15	12250	90

Указанные смеси смешивались с пластификатором (5%-й раствор синтетического каучука в бензине). Заготовки необходимых размеров прессовались в формах (давление прессования 0,7 - 1,0 т/см<sup>2</sup>), которые потом спекались при 1400 - 1500 °С в защитной атмосфере (водород) в печи любой системы, позволяющей обеспечить заданную температуру.

Наиболее предпочтительным является применение электродов из материала состава 90%ВК6 + 10%1М, позволяющих формировать поверхностный слой с микротвердостью до 14000 МПа и более.

На рис. 3.92 изображены микроструктуры поверхностного слоя стали Р6М5 после ЭЭЛ электродами, изготовленными из композиционного материала, состоящего из твердого сплава ВК6 и сплава 1М в различных соотношениях.

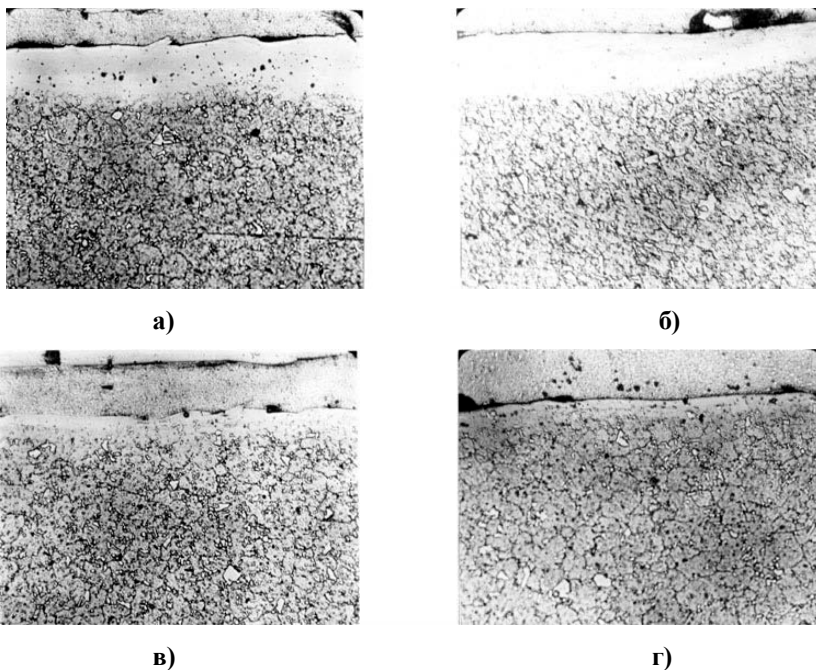


Рисунок 3.92 - Микроструктуры поверхностного слоя стали Р6М5 с композиционными покрытиями состава: а - 100% 1М; б - 10% 1М + 90% ВК6; в - 1М + 100% ВК6; г - 1М + 10% 1М + 90% ВК6; х 400

Таким образом, порошковая металлургия позволяет изготавливать электродные материалы необходимого состава и с высокими эксплуатационными характеристиками в покрытии при ЭЭЛ.

### **3.6.2.3. Интегрированные технологии, сочетающие ЭЭЛ с другими способами улучшения режущих свойств инструментов**

В данном случае рассматриваются результаты исследований процессов упрочнения рабочих поверхностей лезвий режущих инструментов (метчиков) из быстрорежущей стали Р6М5 путем совмещения методов КИБ (см. разд. 3.4) и ЭЭЛ. Упрочнение метчиков методом КИБ производилось на установке «Булат-3Т» и предварительным или последующим ЭЭЛ на установке «Елфа-541».

Карбиды молибдена и хрома наносились на метчики в течение 25 мин при температуре  $520 \pm 20$  °С с предварительной очисткой упрочняемых поверхностей в тлеющем разряде в течение 10 мин. Температура инструмента в процессе разогрева и осаждения износостойкого покрытия контролировалась с помощью инфракрасного пирометра типа «Смотрич 1-1- 03».

Метчики устанавливались на агрегатный восьмишпиндельный специальный станок мод.5855 для нарезания резьбы в конусной гайке (У - 156А) из латуни. Результаты испытаний приведены в табл. 3.15.

Таблица 3.15 - Коэффициент увеличения стойкости метчика при нарезании резьбы в деталях из латуни

Инструмент	Инструм. материал	Легирующий материал	Способ	Установки	Коэффициент стойкости
Метчик М22 х 1,5	Р6М5	ВК6М + Мо+ + С (Эг -4)	КИБ + ЭЭЛ	"Булат - 3Т"+ "Елфа-541"	1,76 - 1,82
Метчик М22 х 1,5	То же	То же	ЭЭЛ + КИБ	Булат - 3Т"+ "Елфа-541"	1,88 - 1,94
Метчик М22 х 1,5	То же	То же	ЭЭЛ + Эп	"Елфа-541" Эп +	2,5 - 2, 8

Как видно из таблицы, более высокой стойкостью (1,88 - 1,94 раза) при нарезании резьбы в латунных деталях обладают метчики, упрочненные по комбинированной технологии ЭЭЛ + КИБ. Несколько меньшие показатели увеличения стойкости (1,76 -1,82 раза) метчиков, упрочненных по схеме КИБ + ЭЭЛ, можно объяснить тем, что возможно ЭЭЛ несколько разрушает ранее сформированное на ней методом КИБ покрытие.

Анализируя причины относительно низкого увеличения коэффициента стойкости упрочненных метчиков при нарезании резьбы в латунных деталях (1,5 - 1,9 раз), когда аналогичное упрочнение позволяет добиваться 5 - 7-кратного увеличения их стойкости при нарезании резьбы в таких труднообрабатываемых материалах, как высоколегированные нержавеющей

стали 12Х18Н10Т, 10Х17Н13М3Т, было установлено, что основной причиной выхода из строя метчиков является налипание латуни на переднюю и заднюю поверхности зубьев, т.е. имело место адгезионное схватывание.

Учитывая вышесказанное, метчики для нарезания резьбы в латунных деталях после ЭЭЛ подвергались эпиламинированию (ЭП), которое в значительной степени снижает коэффициент трения, способствует снижению температуры в зоне резания и в итоге затрудняет адгезию, повышая стойкость инструмента (табл. 3.15). Сущность процесса эпиламинирования заключается в обработке рабочих поверхностей лезвия эпиламом. Эпилам - композиция, состоящая из растворителей: хладон 113, смесь хладонов 112 и 113, хладонов 114В2 и им подобных с введением в них поверхностно-активных веществ.

В результате ЭП на поверхностях лезвия образуется мономолекулярный слой ПАВ, резко снижающий трение между инструментом и обрабатываемым материалом, что, в свою очередь, способствует значительному снижению износа инструмента и увеличению срока его службы.

Наличие пленки ЭП можно определять с помощью капли масла, нанесенной на поверхность инструмента. Капля небольшого размера должна удерживаться на наклонной поверхности и сохранять форму, близкую к сферической (не должна растекаться)

#### ***3.6.2.4. Интегрированные технологии улучшения режущих свойств инструментов методом ЭЭЛ пучком электродов.***

Новый способ упрочнения металлорежущего инструмента осуществляется следующим образом. В цангу для крепления электрода совместно с электродом из твердого сплава вставляется электрод из молибдена и (или) углерода (графита). Таким образом, происходит обработка упрочняемой поверхности пучком электродов. Предлагаемый новый способ ЭЭЛ пучком электродов позволяет значительно повысить износостойкость формируемых покрытий. Шероховатость покрытий снижается. Например, если при ЛЕН электродом ВК6М  $\varnothing 1,0$  мм на третьем режиме шероховатость покрытия составляет  $Ra = 0,9...1,35$  мкм, то легирование на этом же режиме пучком электродов из твердого сплава ВК6М, молибдена и углерода (графита), каждый из которых имеет  $\varnothing 1,0$  мм, позволяет получать покрытия, шероховатость которых  $Ra = 0,5...0,6$  мкм.

Предлагаемая комбинация электродных материалов наряду с новым способом нанесения их на режущие кромки инструментов позволяет резко повысить (в 2 - 3 раза) стойкость металлорежущего инструмента по сравнению с ранее существующим. Можно предположить, что совместное легирование твердым сплавом ВК6М с углеродом позволяет формировать в покрытии более сложные карбиды вольфрама  $W_2C$ , а совместное легирование молибдена с углеродом - карбиды молибдена.

Новый способ нанесения покрытий на механизированных установках типа "Элфа" прошел производственную апробацию на химическом

производстве СМНПО им. М.В. Фрунзе (г. Сумы) при нарезании резьбы в труднообрабатываемых материалах. Испытывались как упрочненные, так и неупрочненные метчики М10 при нарезании резьбы в рамках и корпусах, метчики М12 при нарезании резьбы в цапфах, толкателях и роторах второго каскада. Результаты испытаний как упрочненных, так и неупрочненных метчиков отражены в табл. 3.16.

Таблица 3.16 - Результаты сравнительных производственных испытаний метчиков, упрочненных пучком электродов из твердого сплава ВК6М, молибдена и углерода (графита марки ЭГ-4)

Метчик	Материал детали	Количество отверстий обработанных метчиком		Коэффициент стойкости
		Неупрочненным	Упрочненным	
М10 x1,0	12Х18Н10Т	26	186	6,6
10 x1,0	12Х18Н10Т	38	190	5,0
М10 x1,0	12Х18Н10Т	31	194	6,2
М12 x1,0	Х18Н9Т	31	163	5,2
М12 x1,0	Х18Н9Т	34	170	5,0
М12 x1,0	Х18Н9Т	30	168	5,6
М12 x1,0	10Х17Н13М3Т	36	242	6,7
М12 x1,0	10Х17Н13М3Т	28	204	7,2
М12 x1,0	10Х17Н13М3Т	32	220	6,8

Как видно из таблицы, стойкость упрочненных метчиков выше неупрочненных в 5,0 - 7,2 раза, что свидетельствует о перспективности новой технологии упрочнения металлорежущего инструмента на механизированных установках типа «Элфа – 541».

***Вопросы для самостоятельного контроля***

1. Способы опережающего холодного пластического деформирования.
2. Физическая сущность воздействия холодного пластического деформирования на обрабатываемость металлических материалов резанием.
3. Упрощенная схема свободного прямоугольного резания металлических материалов в контексте воздействия на них предшествующего холодного пластического деформирования.
4. Физическая сущность природы нароста при резании и воздействие на наростообразование предварительного холодного деформирования обрабатываемых резанием металлических материалов.
5. Перспективы использования схемы "предварительное холодное пластическое деформирование – обработка резанием"
6. Что такое деформирующее протягивание? Натяг на деформирующий элемент.
7. Чем отличается деформирующее протягивание от других видов холодного деформационного упрочнения?
8. Особенности режущего протягивания.
9. Последовательность режущего протягивания отверстий.
10. Протяжки группового резания.
11. Общность деформирующего и режущего протягивания.
12. Влияние предварительного холодного деформирования на обрабатываемость металлических материалов резанием.
13. Особенности схемы комбинированного протягивания. Функции правящего, основного и упрочняющего деформирующих элементов.
14. Режущая часть комбинированной протяжки.
15. Материалы для деформирующей, режущей, демпфирующей и вспомогательных частей комбинированной протяжки.
16. Физическая модель комбинированной протяжки.
17. Что понимается под прирабатываемостью трущихся поверхностей?
18. Каков механизм упрочнения контактных поверхностей инструмента в процессе резания?
19. Почему приработка резанием закаленных и труднообрабатываемых материалов обнаруживает повышенный эффект упрочнения рабочих участков инструмента?
20. Чему соответствуют оптимальные условия упрочнения по температуре и уровням давлений и почему?
21. Начертите и объясните кинетику упрочнения контактных слоев инструмента как изменение их плотности дислокации.
22. Как определить глубину охвата и степень упрочнения рабочих участков инструмента и чему они равны?

23. Почему упрочнение инструмента реализуется слабо при температурах резания ниже  $200^{\circ}\text{C}$  и инструмент не упрочняется при температурах резания выше  $400^{\circ}\text{C}$ ?

24. Какую скорость приработки следует назначить при резании конструкционной стали и труднообрабатываемых материалов?

25. Как Вы используете приработку инструмента при назначении режимов резания на станках с ЧПУ? Покажите пример.

26. Как Вы используете приработку инструмента при серийном производстве изделий, например, зубо- и шлицефрезеровании?

27. Охарактеризуйте процесс тангенциального точения в сравнении с обычным (радиальным) точением. Объясните отличие встречного тангенциального точения от попутного и нарисуйте схему тангенциального точения.

28. Перечислите основные специфические особенности процесса тангенциального точения.

29. Охарактеризуйте закон изменения толщины среза при тангенциальном точении за цикл обработки. В чем причина отличия действительного закона изменения толщины среза от теоретического?

30. Что такое трансформация рабочих углов в течение цикла обработки при тангенциальном точении? Укажите ее особенности при попутном и встречном точении.

31. Охарактеризуйте теоретические предпосылки сухого резания при ТТ.

32. Охарактеризуйте влияние параметров режима резания (скорости, подачи и величины снимаемого припуска) при ТТ на температуру резания.

33. Охарактеризуйте изменение температурного поля и температурных напряжений в системе резания в течение всего цикла "резание-отдых" при ТТ.

34. Перечислите технологические возможности процесса попутного тангенциального точения.

35. Охарактеризуйте принцип действия двенадцати шпиндельного автомата попутного точения КА-350.

36. Нарисуйте и объясните схему снятия припуска при обработке внутреннего кольца подшипника на станке КА-350.

37. Приведите формулу для определения толщины среза при попутном тангенциальном точении.

38. Приведите формулы для определения кинематических переднего и заднего углов инструмента при попутном тангенциальном точении.

39. Почему с увеличением количества потоков обработки возрастает цикловая производительность станка?

40. Перечислите и охарактеризуйте основные преимущества станков роторного типа с тангенциальной схемой резания.

41. Охарактеризуйте обработку заготовки с предварительно штампованными зубьями широким резцом с большим углом наклона режущей кромки и тангенциальной подачей.

42. Охарактеризуйте расширение технологических возможностей станков – автоматов (полуавтоматов) непрерывного действия с тангенциальной схемой резания путем увеличения количества потоков.

43. Охарактеризуйте расширение технологических возможностей станков – автоматов (полуавтоматов) непрерывного действия с тангенциальной схемой резания путем одновременной обработки двух и более деталей.

44. Охарактеризуйте модульный принцип конструирования станков – автоматов (полуавтоматов) непрерывного действия с тангенциальной схемой резания.

45. Охарактеризуйте расширение технологических возможностей станков – автоматов (полуавтоматов) непрерывного действия с тангенциальной схемой резания путем использования групповой технологии.

46. Объясните принцип совмещения традиционных методов обработки с высокопроизводительным тангенциальным резанием (А.с. 1445859, Патент UA №14099).

47. Какая толщина вакуумно-плазменных пленочных покрытий, используемых для режущих инструментов?

48. Что понимают под термином «адгезионная активность» между инструментальным и обрабатываемым материалом?

49. Какие условия контактирования стружки рассматривают в двухзонной модели трения?

50. Какой участок контакта стружки «пластический» или «упругий» оказывает влияние на формирование контактных процессов и стружкообразование?

51. Почему среднее контактное давление  $q_n$  для инструмента с покрытием выше, чем без покрытия, несмотря на уменьшение сил резания  $P_1$  и  $P_2$ ?

52. Где расположены зоны А и Б в лунке износа инструмента и в какой из этих зон проявляются износостойкие свойства покрытия?

53. Почему у инструмента с покрытием в лунке износа возникают устойчивые заторможенные зоны, увеличивающие стойкость инструментов?

54. Почему при обработке труднообрабатываемых материалов не получено эффекта от применения покрытий на быстрорежущем инструменте?

55. Почему однослойное покрытие не позволяет разрешить противоречивых требований, предъявляемых к свойствам покрытия для режущих инструментов?

56. Назовите 5 основных характеристик покрытия, которые определяют его эксплуатационные свойства.

57. Назовите оптимальный состав трехслойного покрытия из нитридов переходных металлов рекомендуемого для инструментов из быстрорежущей стали при обработке железоуглеродистых материалов.

58. Кем был разработан метод ЭЭЛ?
59. В чем заключается сущность процесса ЭЭЛ?
60. Что является анодом при ЭЭЛ?
61. Что является катодом при ЭЭЛ?
62. Почему при ЭЭЛ происходит разрушение электродов?
63. Какая сфера применения метода ЭЭЛ?
64. Какие направления ЭЭЛ различают в наше время?
65. Какое приспособление применяется для крепления анода-электрода?
66. Какое оборудование используется для ЭЭЛ?
67. В чем заключается сущность метода локального электроискрового нанесения?
68. Какое оборудование используется для локального электроискрового нанесения?
69. Какие материалы применяются для изготовления электродов при нанесении износостойких покрытий?
70. Какие технологии относят к комбинированным технологий ЭЭЛ?
71. В чем состоит сущность процесса эпиламинирования?
72. В чем сущность комбинированных технологий ЭЭЛ?

**Список литературы к главе 3**

1. Афтаназів І.С. Підвищення надійності деталей машин поверхневим пластичним деформуванням: Навч. посібник / І.С. Афтаназів, А.П. Гавриш, П.О. Киричок та ін. – Житомир: ХІТІ, 2001. – 516 с.
2. Посвятенко Е. К. Особливості механіки різання матеріалів, зміцнених холодною деформацією / Е.К. Посвятенко, Н.І. Посвятенко, Р. В.Будяк // Резание и инструмент в технологических системах. – 2012. – Вип. 81. – С. 238–248.
3. Развитие науки о резании металлов / В.Ф. Бобров [и др.]. – М.: Машиностроение, 1967. – 414 с.
4. Розенберг А. М. Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания / А. М. Розенберг, О. А. Розенберг; отв. ред. П. Р. Родин. – К.: Наук. думка, 1990. – 320 с.
5. Инструменты из сверхтвердых материалов / под ред. Н.В. Новикова и С.А. Клименко. – Изд-е 2-е перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2014. – 608 с.
6. Кацев П. Г. Обработка протягиванием / П. Г. Кацев. – М.: Машиностроение, 1986. – 272 с.
7. Основи теорії різання матеріалів: підручник / М. П. Мазур [та ін.]; під ред. М. П. Мазура. – Львів : Новий Світ. – 2000, 2010. – 422 с.
8. Патент на винахід 89326 Україна, МПК (2014.01) В23Р 15/00. Комбінована деформуючо-різальна протяжка / Посвятенко Е.К., Паладійчук Ю.Б., Посвятенко Н.І., Будяк Р.В.; власник Вінницький національний аграрний університет; – № у 2013 14974; заявл. 20.12.2013; опубл. 10.04.2014, Бюл. № 7.
9. Расчет и проектирование твердосплавных деформирующих протяжек и процесса протягивания / А. М. Розенберг [и др.]. – К.: Наукова думка, 1978. – 256 с.
10. Родин П. Р. Металлорежущие инструменты: учебник / П. Р. Родин. – К.: Вища школа, 1986. – 456 с.
11. Якубов Ф.Я., Исследование причин немонотонного изменения зависимости «Скорость резания – стойкость режущего инструмента». – Ташкент: Политехнический институт, 1966, 136 с.
12. Якубов Ф.Я., Способ повышения стойкости металлорежущего инструмента. Авторское свидетельство № 1055991, Б.И. № 13, 1983 /Соавт: Ким В.А., Симашев Э.Г.
13. Якубов Ф.Я. Энергетические соотношения процесса механической обработки материалов. – Ташкент: ФАН, 1985. – 112 с.
14. Лоладзе Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента, – М.: Машиностроение, 1982 – 320 с.

15. Одинг И.А. Теория дислокации и ее применение. – М.: Изд-во АН СССР, 1959. – 80 с.
16. Якубов Ч.Ф. Упрочняющее действие ОТС при обработке металлов резанием. – Симферополь: ОАО Симферопольская городская типография, 2008 – 156 с.
17. Костецкий Б.И. Структурно-энергетическая приспособляемость материалов при тернии // Трение и износ. – Минск, 1985 – Т. VI – № 2. – с. 201-212.
18. Залого В.А. Разработка научных основ и принципов практического применения нестационарных видов обработки резанием на базе попутного тангенциального течения: дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.01: утв. 08.11.2000г./ ЗалогоВильм Александрович. – Х., 2000. – 327 с.
19. Мазур М.П. Основи теорії резання матеріалів: підручник [для вищ. навч. закладів] / М.П. Мазур, Ю.М Внуков, В.Л. Доброскок, В.О. Залого, Ю.К. Новосолов, Ф.Я. Якубов; під заг. ред. М.П. Мазура. - Львів: Новий Світ-2000, 2010. – 422 с.
20. Залого В.А., Криворучко Д.В. Классификация факторов, определяющих нестационарность процессов резания, и их влияние на выходные параметры механической обработки// ВЕСТНИК ХГПУ. Серия НРСТ: Новые решения в современных технологиях. – Х.: ХГПУ, 2000. – Вып. 77. – С. 35-38.
21. Ермаков Ю. М. Технология и станки тангенциального течения. – М.: Машиностроение, 1979. – 152 с.
22. Залого В. А., Приходько В. В. Исследование влияния переднего угла инструмента на характер изменения параметров среза и силы резания при попутном тангенциальном течении. Высокие технологии в машиностроении: моделирование, оптимизация, диагностика: материалы международной НТК 27 сентября – 2 октября. – Х: ХГПУ, 1995. – С. 50 – 52.
23. Залого В. А., Приходько В. В., Иовенко Л. А. Методика исследования процесса стружкообразования при попутном тангенциальном резании. //Сб. Резание и инструмент в технологических системах. -Международный научно-техн. сборник. –Х: ХГПУ, 1995-1996. Вып. 50. – С. 72-76
24. Залого В.А., Приходько В.В., Криворучко Д.В., Иовенко Л.А. К теоретическому анализу кинематики процесса попутного тангенциального течения//Сб. Резание и инструмент в технологических системах. Международный научно-техн. сборник. – Х: ХГПУ, 1997. Вып. 51. – С.101-105.
25. Залого В. А., Приходько В. В., Криворучко Д. В. Теоретическое описание кинематики процесса попутного тангенциального течения. Высокие технологии в машиностроении: тенденции развития, менеджмент, маркетинг: труды VII международного научно-технического семинара, 24-28сентября 1997г. – Х: ХГПУ, 1997.

26. Хворост В.А., Залого В.А., Кулиш А.Н., Колонин А.А. К вопросу о кинематике тангенциального резания //Вестник Сумского государственного университета. – Сумы: СумГУ,1994. Вып. 1. С. 54-59.
27. Sakuma Keizo, Onikura Hiromichi. Cutting mechanism of skiving// Mem. Fac. Eng. Kyushu Univ. – 1976. V. 35. №3. – P. 169-185.
28. Бобров Б.Ф. Основы теории резания металлов. – М.: «Машиностроение», 1975. – 344 с.
29. Остафьев В.А. Расчет динамической прочности режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 1979. – 168 с.
30. Лоладзе Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 1982. – 320 с.
31. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания. – М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.
32. Трение, изнашивание и смазка: Справочник. Т. 2. – М.: Машиностроение, 1979. – 358 с.
33. Кабалдин Ю.Г., Шпилев А.М., Просолович А.А. Синергетический анализ причин возмущения вибраций при резании//Вестник машиностроения. –1997. №10. С. 21-29.
34. Резников А.Н. Теплофизика резания. – М.: Машиностроение, 1969. – 288 с.
35. Залого В.А., Приходько В.В., Гребенюк А.Г. Методика исследования сил резания при попутном тангенциальном резании. Вестник СумГУ. – Сумы: СумГУ, 1996. №1(5). С. 44 – 47.
36. Залого В.А., Приходько В.В. Исследование динамических характеристик процесса резания с попутной тангенциальной подачей// Сб. Резание и инструмент в технологических системах: Международный научно-техн. сборник. – Х: ХГПУ, 1994. Вып. 49. – С. 162-164.
37. Залого В.А., Криворучко Д.В. Методика теоретического анализа деформационных процессов в зоне стружкообразования при попутном тангенциальном точении//Вестник Сумского государственного университета. -1998. №2. -С. 101-105.
38. В.А. Залого, Д.В. Криворучко. Методика расчета температуры резания при тангенциальном точении. – Прогрессивная техника и технология машиностроения, приборостроения и сварочного производства: Труды международной научно – технической конференции, посвященной 100-летию механико - механического и 50-летию сварочного факультетов НТУУ «КПИ» (25-28 мая 1998г.). В четырех томах. Т.4. – Киев: НТТУ, 1998. – с.333-339.
39. А.Н. Резников, Л.А. Резников. Тепловые процессы в технологических системах. – М.: Машиностроение, 1990. – 298с.

40. В.А Залого, Д.В. Криворучко. Алгоритм моделирования стружкообразования при тангенциальном точении. Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье: Сборник научных трудов ХГПУ. Вып.6. В четырех частях. Ч. 4. – Харьков: ХГПУ, 1998. – с. 91-93.
41. В.А. Залого, Д.В. Криворучко. Анализ контактных температур в системе резания при тангенциальном точении. – Высокие технологии в машиностроении. Сборник научных трудов ХГПУ, - Харьков, 1998г. – с. 118-126.
42. König W., Berkold A., Liermann J. Drehräumen – ein neues Fertigungsverfahren für gehärtete Bauteile// VDI-Z. –1994. V. 136. № 6. –S. 50-58
43. Шаумян Г.А. и др. Двенадцати шпиндельный автомат непрерывного действия модели КА-350. Каталог. Машины, приборы, стенды. – М.: МВТУ им. Баумана, 1974. – №4. – 113 с.
44. Хмельницкий Ю.В., Залого В.А., Киктенко А.Н. Точность геометрической формы и шероховатость поверхности, обработанной попутным точением// Сб. Резание и инструмент. Респ. межвед. науч.-техн. сборник – Х: Вища школа. Изд-во при Харьк. ун-те, 1983. – Вып. 30. – С. 34-38.
45. Залого В.А., Парфененко С.Г., Киктенко А.Н. Прогрессивный способ обработки заготовок со штампованным зубом// Основные направления экономии и рационального использования металла в автотракторостроении: Тезисы докладов Всесоюзной НТК 16-19 октября 1984г. – Челябинск, 1984. – С.311-312.
46. Залого В.А. Разработка научных основ и принципов практического применения нестационарных видов обработки резанием на базе попутного тангенциального точения: автореф. дисс. на соискание учен. степени докт. техн. наук: спец. 05.03.01 «Процессы механической обработки, станки и инструменты» / В. А. Залого. – Х., 2000. - 33 с.
47. Хмельницкий Ю.В., Залого В.А., Парфененко С.Г., Киктенко А.Н. Многошпиндельный токарный станок. А.с. СССР. №1445859. Оpubл. Бюл. №47, 23.2.6.88. Патент UA. №14099, Оpubл. Бюл. №2, 25.04.97.
48. Залого В.А., Хмельницкий Ю.В., Парфененко С.Г. Расширение технологических возможностей многошпиндельных роторных автоматов попутного точения // GEPGYARTASTECHNOLOGIA A MUSZAKI FOLYOIARATA, XXXIV. EVFOLYAM (венгр.). –1994. –№ 7-8. –S. 335-339.
49. Хмельницкий Ю.В. Конструирование станочных оправок для гибких производственных систем//СТИН. –1993. –№1. – С. 23-26.
50. А.с. 1445859 SU, МКИ В23В 9/00. Многошпиндельный токарный станок. / Ю.В. Хмельницкий, В.А. Залого, С.Г. Парфененко, А.Н. Киктенко (СССР). - Заявлено 11.02.87; Оpubл. 23.12.88, Бюл. №47. -3с. Патент UA №14099. Оpubл. 25.04.97, Бюл. №2.

51. Хмельницкий Ю.В., Залого В.А., Закоморный С.Н. Групповая обработка деталей на многошпиндельных роторных автоматах// Вестник Сумского государственного университета. – Сумы: СумГУ, 1995. Вып. 3. – С. 54-56.
52. Внуков Ю.Н. Повышение износостойкости быстрорежущих инструментов на основе исследований условий их трения с обрабатываемыми материалами и реализации новых технологических возможностей: дисс. доктора техн. наук / Внуков Юрий Николаевич. – М., 1992. – 371 с.
53. Еремин А.И. Физическая сущность явлений при резании сталей / Еремин А.И. – М.: Свердловск. – Машгиз, 1951. – 226 с.
54. Зорев Н.Н. О взаимозависимости процессов в зоне стружкообразования и в зоне контакта передней поверхности инструмента: Вестник машиностроения, 1963, – №12. – С.42-50.
55. Нанесение износостойких покрытий на режущий инструмент / Под ред. Внукова Ю.Н.–К.: Техника, 1992. –143 с.
56. Полетика М.Ф. Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента / Полетика М.Ф. – М.: Машиностроение. – 1969. – 148 с.
57. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / Резников А.Н. – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с.
58. Sata T., Mizuno M. Friction process on cutting tools and cutting mechanism // Journal scient Research Inst.– June. – V. – 49. – 1955
59. Самсонов Г.В. Электроискровое легирование металлических поверхностей / Самсонов Г.В., Верхотуров А.Д., Бовкун Г.А., Сычев В.С. // К.: Наукова думка, 1976. – 220 с
60. Гитлевич А.Е. Электроискровое легирование металлических поверхностей / Гитлевич А.Е., Михайлов В.В., Парканский Н.Я., Ревутский В.М. // Кишинев: Штинца, 1985. – 196с.
61. Лазаренко Н.И. Электроискровое легирование металлических поверхностей. // М.: Машиностроение, 1976. – 46 с.
62. Підвищення стійкості різального інструменту технологічними методами : навч. посібник / В.Б. Тарельник, Є.В. Конопляченко, В.С. Марцинковський та ін.; за ред. проф. В. Б. Тарельника. - Суми : Унів. книга, 2011. - 188 с. - ISBN 978-966-680-545-7
63. Тарельник В.Б.. Комбинированные технологии электроэрозионного легирования.- К.: Техника, 1997.-127 с.
64. Тарельник В.Б. Новий спосіб електроерозійного легування металорізального інструмента на механізованих установках типу «Елфа» // Автоматизація технологічних процесів та промислова екологія.- вип. 1.-Київ.- 1997.- С. 89-90.

65. Тарельник В.Б. Электроэрозионное упрочнение металлорежущего инструмента для обработки коррозионно-стойких сталей/ Тарельник В.Б., Кучмий А.Н.// Химическое и нефтяное машиностроение.- 1997.- № 1.- С. 70-71.
66. Тарельник В.Б. Новые электродные материалы для электроэрозионного легирования металлорежущего инструмента // Вісник Східноукраїнського державного університету.- 1997.- С. 190-195.
67. Тарельник В. Комбіновані технології зміцнення металорізального інструменту для оброблення важкообробних і кольорових сплавів // Машинознавство.- 1999.- № 11.- С. 36-39.
68. Тарельник В. Б. Технологические основы управления качеством поверхностного слоя деталей и инструмента комбинированными технологиями электроэрозионного легирования // Вестник Харьковского государственного политехнического университета.- вып. 110.- 2000.- С. 75-95.
69. Тарельник В. Б. Проблемы формирования качества поверхностных слоев деталей и инструментов // Вестник Харьковского государственного политехнического университета.- вып. 118.- 2000.- С. 35-38.
70. Захаров Н. В. Комбинированная технология упрочнения металлорежущего инструмента для обработки латунных деталей / Захаров Н. В., Тарельник В. Б.// Надежность режущего инструмента и оптимизация технологических систем.- Краматорск: ДГМА.- 1999.- С. 186-190.
71. Тарельник В.Б. Управление качеством поверхностных слоев деталей комбинированным электроэрозионным легированием. // Сумы.: Изд-во «МакДен», 2002. – 323 с.
72. Тарельник В.Б. Способ электроэрозионного легирования: А. с. 1734968 СССР, МКИ В 23 Н 9/00 / Тарельник В.Б., Иванов Л.А., Марченко В.Г.// (СССР).- № 4484364/08; Заявлено 20.09.88; Опубл. 23. 05. 92. Бюл. № 19.- 2 с.

## **ГЛАВА 4. ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ПРОЦЕССЫ ОБРАБОТКИ АБРАЗИВНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ**

*Интегрированные технологии сегодня - это база для создания конкурентоспособных изделий во всех отраслях промышленности [1]. Они позволяют расширить понятие технологии до взаимосвязанной совокупности научно-исследовательских, опытно-конструкторских, инженеринговых и управленческих процессов, являющихся основой продуктивной и творческой деятельности человечества. В процессы создания наукоемких, высокотехнологических изделий включаются множество новейших технологических решений, и технологии, раньше четко разграниченные и, будто бы, отдаленные одна от другой, сближаются и соединяются в один интегрированный технологический процесс. Это в полной мере относится и к процессам алмазного шлифования.*

*Разработке и внедрению интегрированных комплексных технологий алмазного шлифования для производства наукоемких изделий машиностроения и посвящен данный раздел, ибо именно интегрированные технологии дают возможность активировать режущую способность кругов, а, следовательно, существенно расширить технологические возможности процесса алмазного шлифования.*

### **4.1. Разработка методологии управления параметрами режущего рельефа алмазно-абразивного инструмента**

Процесс алмазного шлифования с управлением режущим рельефом круга (РПК) будем рассматривать на примере обработки поликристаллических сверхтвердых материалов (ПСТМ) на основе алмаза и плотных модификаций нитрида бора. Основным условием высокой эффективности алмазного шлифования PSTM является сохранение в процессе всего периода обработки такого состояния рабочей поверхности кругов, когда совокупность ее режущих алмазных элементов способна передавать прилагаемую нагрузку на бесконечно малые участки обрабатываемой поверхности, обуславливая в окрестностях пятна упругого контакта локальные напряжения, превышающие значения критических для данного сверхтвердого материала, благодаря чему доля энергии, идущей на разрушение, в общих затратах возрастает, обобщенным результатом чего является интенсивный сьем PSTM.

Высокоэффективные процессы алмазного шлифования PSTM необходимо базировать на принципе непрерывного формирования энергетически неустойчивого состояния с целью предотвращения структурно-топографической приспособляемости взаимодействующих поверхностей при обеспечении статистически неизменных оптимальных параметров режущего рельефа круга в течение всего периода шлифования [1]. Это означает, что устойчивость выходных показателей

высокопроизводительной обработки ПСТМ обеспечивается неустойчивой рабочей поверхностью круга, т. е. алмазные зерна могут эффективно шлифовать ПСТМ только тогда, когда сами будут разрушаться с оптимальной интенсивностью, сохраняя необходимую развитость субмикрорельефа [2]. Стабилизация же выходных показателей процесса достигается тем, что, оказывая специальное дозирующее воздействие на рабочую поверхность круга и на алмазные зерна, обеспечивается соответствие темпа восстановления ее параметров темпу изменения в зоне шлифования в зависимости от требований обработки ПСТМ. Нужно непрерывно сообщать рабочей поверхности круга и обрабатываемой поверхности ПСТМ дополнительную энергию, которая обеспечила бы увеличение полезной энергии разрушения в общем объеме затрат, сделав структуру поверхности энергетически неустойчивой, и обеспечила бы в результате предотвращение структурно-топографической приспособляемости. Поскольку показатели шлифования наиболее тесно связаны с относительной величиной фактической площади контакта «РПК–ПСТМ», следует оптимизировать величину дополнительной энергии, сообщаемой взаимодействующим поверхностям с целью исключения неоправданно большого расхода алмазов и возможности эффективного использования всего диапазона приспособляемости.

Таким образом, в отличие от положения Б. И. Костецкого [2] об инверсии финишной абразивной обработки в основном за счет воздействия на обрабатываемый материал, нами в качестве определяющего объекта управления выбрана и рабочая поверхность круга, и обрабатываемый материал. Управление процессом приспособляемости за счет воздействия на обрабатываемую поверхность ПСТМ осуществляется путем изменения условий динамического воздействия энергией ультразвука и использования влияния анизотропии свойств кристаллитов ПСТМ на изменение характера взаимодействия элементов системы «РПК–ПСТМ».

Попытка интенсифицировать процесс за счет увеличения давления в контакте «ПСТМ–РПК» (например, увеличением поперечной подачи) в большинстве случаев приводит к браку из-за появления сетки микротрещин на обработанной поверхности ПСТМ. Разработанные ранее способы шлифования с управлением режущим рельефом кругов устраняли этот недостаток в основном за счет управляемого дозируемого удаления связки круга (например, электрохимическим способом) и, тем самым, принудительно удаляли «тормозящие» процесс алмазные зерна с площадками износа с поверхности РПК [3]. Такой процесс, безусловно, эффективен, однако он характеризуется повышенным расходом алмазных зерен и, как следствие, низким коэффициентом использования их потенциально высоких режущих свойств. Известные способы формирования субмикрорельефа на алмазных зернах путем подачи в зону шлифования свободного абразива

связаны с большой сложностью их практического применения и дополнительным расходом дорогостоящего алмазного порошка [4].

Перспективным представляется использование опыта ультразвуковой обработки хрупких неметаллических материалов [5-7]. Как известно, ультразвук в последние годы нашел широкое применение в промышленности при обработке ряда твердых и хрупких материалов. Проведены были также опыты по резке кристаллов алмаза с применением ультразвука [8], закончившиеся положительным результатом.

Ультразвуковая обработка хрупких материалов состоит из двух основных процессов: процесса ударного, упругого заглабления абразивных зерен, вызывающего выкалывание частиц обрабатываемого материала и процесса циркуляции абразива в рабочей зоне, в результате которого происходит унос из зоны шлифования выколотых частиц обрабатываемого материала и доставка свежего абразива.

Применение дополнительной энергии в виде ультразвуковых колебаний, вводимых в зону шлифования и/или в зону управления, позволит реализовать принцип инверсии приспособляемости за счет изменения динамических условий нагружения системы. При этом могут быть использованы особенности кристаллического строения составляющих ПСТМ и алмазных зерен, а также анизотропия их физико-механических свойств.

Предложен способ повышения режущей способности алмазных кругов за счет непрерывного управляемого формирования на площадках износа алмазных зерен режущего субмикрорельефа путем введения в зону шлифования и/или в зону управления энергии ультразвуковых колебаний [9]. В основу данного интегрированного способа положен процесс ультразвукового шлифования и ультразвуковой активации РПК [10].

Основным назначением энергии ультразвуковых колебаний, вводимой в зону шлифования и/или управления, является принудительное формирование субмикрорельефа алмазных зерен. Именно при принудительном микроразрушении зерен генерируются новые острые режущие микрокромки, которые обеспечивают интенсивность удаления объемов материала припуска. Появление уплощения вершин с началом приспособляемости снижает и впоследствии полностью исключает ощутимый съем объемов поликристалла.

Методология управления режущими свойствами кругов в процессе шлифования ПСТМ должна базироваться на формировании и поддержании в течение всего периода обработки энергетически неустойчивых состояний зерен и их структуры путем дозированного воздействия, направленного на предотвращение топографической и структурной приспособляемости рабочей поверхности алмазных кругов. Достичь этого выбором характеристики кругов и режимов шлифования невозможно.

В предложенных и разработанных способах реализуется потенциал двух процессов: удаление связки – формообразование на макроуровне;

принудительное формирование субмикрорельефа на алмазных зернах – формообразование на микроуровне.

Принципиальная схема предложенной методологии управления приспособляемостью приведена на рис. 4.1.

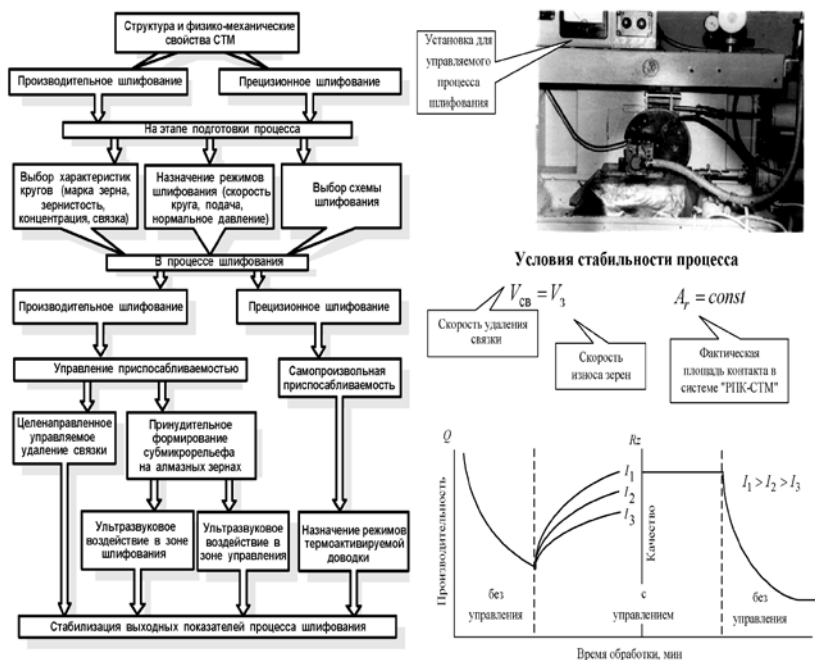


Рисунок 4.1 – Управление приспособляемостью при алмазном шлифовании ПСТМ

Она включает способы, обладающие различными возможностями – от очень ограниченных (режимы шлифования, характеристика круга) до весьма широких, совпадающих по внешним признакам с возможностями методов управления РПК. Очевидно, для их оценки целесообразно вернуться к взаимосвязи параметров режущего рельефа кругов и выходных показателей процесса шлифования.

Установлено, что выходные показатели наиболее тесно связаны с относительной величиной фактической площади контакта в системе «РПК–ПСТМ». Это положение принято в качестве исходного при анализе способов и средств предотвращения структурно-топографической приспособляемости. На этом основании предпочтительными следует

считать такие способы сообщения дополнительной энергии, которые позволяли бы управлять фактической площадью контакта в системе «РПК–ПСТМ».

Способы, которые обеспечат лишь непрерывное микроразрушение зерен, не позволяют оптимизировать их высоту и исчерпают свои возможности, как только значение рабочей высоты выступления верен  $h_p$  станет соизмеримым с шероховатостью поверхности связки.

С другой стороны, способы одновременного разрушения зерен в связке (например, используемые при правке кругов алмазными карандашами, режимы самозатачивания кругов) также не обеспечивают оптимизации величины  $h_p$ .

Отсюда следует вывод о целесообразности использования сочетания этих двух способов предотвращения приспособляемости рабочей поверхности кругов, которые основаны на избирательном воздействии на связку круга с целью управления высотой выступления зерен и принудительного формирования на них режущего субмикрорельефа. Причем, управление процессом приспособляемости осуществляем как на этапе подготовки процесса (выбор характеристик кругов, режимов шлифования и т. д.), так и в процессе шлифования. Определяющим аспектом управления приспособляемостью в процессе обработки в нашем случае является принудительное формирование субмикрорельефа алмазных зерен в зоне шлифования и/или в зоне управления, так как именно субмикрорельеф зерен обеспечивают требуемую эффективность производительного процесса шлифования. При прецизионном (доводочном) процессе дополнительного воздействия на РПК не требуется, т. к. в этом случае ответственными за микросъем являются термоактивируемые процессы.

## **4.2. Алмазное шлифование с вибрациями и управлением рабочей поверхностью кругов**

### **4.2.1. Общие положения**

Алмазное шлифование с управлением РПК предполагает, как правило, использование алмазных или нитридных кругов на прочных металлических связках. В обычных процессах шлифования РПК таких кругов либо быстро засаливается (в случае обработки, например, пластичных материалов), либо сглаживается (при обработке высокотвердых материалов, например, ПСТМ). В последнем случае на зернах образуются устойчивые площадки износа, и процесс съема припуска прекращается. Чтобы его возобновить необходимо путем принудительного удаления связки круга увеличить высоту выступления зерен над уровнем связки до некоего критического значения, при котором возобновится процесс самозатачивания зерен с образованием на них острых микро- и субмикрорельефов. Это позволяет создавать в пятне контакта зерна с обрабатываемым материалом

(ОМ) растягивающие напряжения, достаточные для хрупкого разрушения тончайшего поверхностного слоя ОМ. Таким образом, наибольшая эффективность управляемого процесса шлифования достигается в случае обработки ПСТМ, поскольку практически отсутствует необходимое превышение твердости инструментального материала над ОМ.

Промышленное применение таких процессов показало, что наиболее эффективным из них является процесс, основанный на использовании электрохимического способа удаления металлической связки круга в автономной зоне [11] (т.е. вне зоны шлифования, см. рис. 4.2) с помощью специального катода. Для практической реализации интегрированных процессов шлифования с автономным управлением режущим рельефом кругов имеет принципиальное значение вопрос обеспечения стабилизации управляющего воздействия на рабочую поверхность круга. Некоторые из возможных вариантов решения этой задачи приведены ниже.

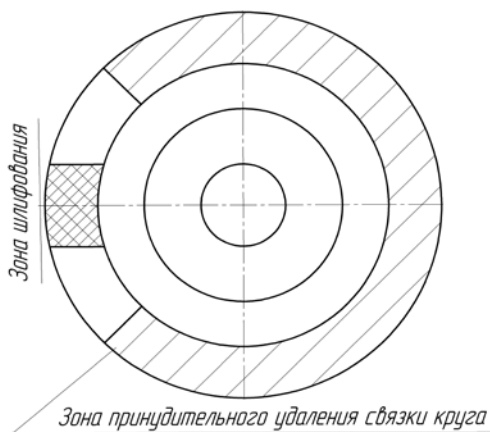


Рисунок 4.2 – Схема расположения зон шлифования и управления РПК

#### **4.2.2. Реализация процесса применительно к заточным станкам, работающим торцевыми кругами**

Принципиальная схема процесса представлена на рисунке 4.3.

Рабочая поверхность правящего катода при этом выполняется, как правило, в виде сектора кольца. Интенсивность (скорость) растворения связки круга, а, следовательно, и восстановления его режущих свойств задается величиной силы тока в цепи управления (цепь: минус источника питания 3, катод 5, алмазный круг 1, токосъемник 4, плюс источника питания 3).

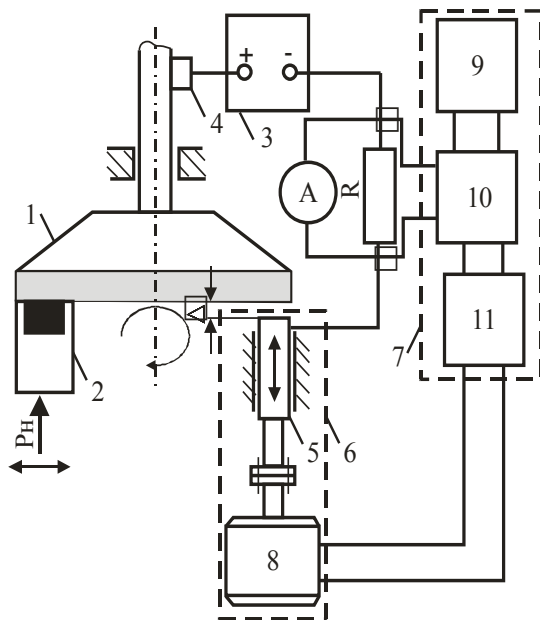


Рисунок 4.3 – Принципиальная схема способа со стабилизацией управляющего воздействия

Регулирование силы тока при неизменном напряжении источника питания осуществляется величиной межэлектродного зазора  $\Delta$  (в результате чего изменяется его электрическое сопротивление). Подвод катода 5 к кругу 1 или отвод от него (в зависимости от величины силы тока в цепи управления) происходит автоматически с помощью механизма перемещения 6 катода 5.

Для этого в составе отмеченного механизма имеется блок автоматики 7, который управляет реверсивным конденсаторным электродвигателем 8. Основными элементами этого блока являются источник стабилизированного напряжения 9, блок сравнения 10, электронный усилитель 11. Информация о величине силы тока в цепи управления снимается с шунта сопротивлением

$R$  в виде падения напряжения, значение которого зависит от силы тока. Это напряжение сравнивается в блоке сравнения 10 со стабилизированным напряжением источника 9. Результирующий сигнал усиливается электронным усилителем и поступает на реверсивный электродвигатель 8. В зависимости от полярности такого сигнала двигатель 8 будет либо подводить катод 5 к кругу 1, либо отводить от него. При этом происходит изменение величины ( $\Delta$ ) межэлектродного зазора (МЭЗ), а, значит, и силы тока ( $I$ ) в цепи управления. Сила тока в цепи управления всецело определяет развитость рельефа РПК (через значение высоты выступания зерен над уровнем связки круга). В

результате можно не только управлять величиной производительности обработки, но и поддерживать необходимое ее значение стабильно на протяжении всего периода работы круга (рис. 4.4).

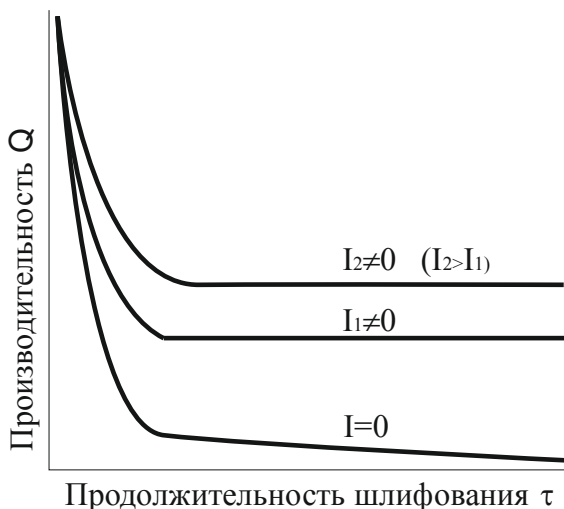


Рисунок 4.4 – Влияние продолжительности шлифования на производительность обработки при различных величинах силы тока в цепи управления

#### 4.2.3. Реализация процесса применительно к кругло-плоскошлифовальным и заточным станкам, работающим периферийными кругами

Использование периферийных алмазных кругов для шлифования имеет ряд особенностей. К ним в первую очередь следует отнести линейный контакт круга с обрабатываемым материалом, а также изменение радиуса круга по мере его износа, в результате чего при неизменном радиусе рабочей поверхности катода нарушается равномерность МЭЗ.

Линейность контакта круга с обрабатываемым ПСТМ требует особой тщательности в соблюдении условия соответствия скоростей износа круга и съема связки, что на практике может быть обеспечено путем применения автоматического следящего устройства (см. рис. 4.3).

Для компенсации отрицательного влияния непостоянства величины МЭЗ на явления, происходящие в зоне управления РПК, необходима разработка специальных правящих устройств, которые имели бы возможность хотя бы

частичной компенсации изменения величины МЭЗ по длине электрического контакта круга и катода.

На рис. 4.5 представлена расчетная схема для определения  $\Delta$ , из которой видно, что величина МЭЗ является функцией трех параметров: угла  $\alpha$ , радиуса рабочей поверхности катода ( $R_{кТ}$ ) и радиуса круга ( $R_к$ ), текущее значение которого меняется по мере износа РПК.

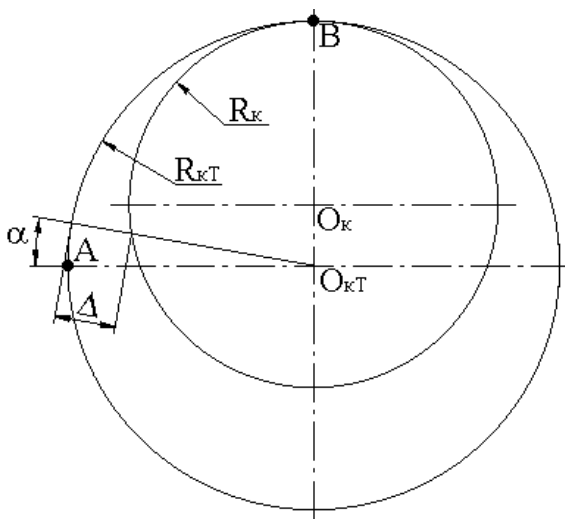


Рисунок 4.5 – Схема, иллюстрирующая изменение зазора  $\Delta$

Схема, иллюстрирующая изменение зазора  $\Delta$ , приведена на рисунке 4.3 (здесь катод и круг условно показаны во взаимном контакте в точке  $B$ ). Применительно к участку  $AB$  можно записать, что:

$$\Delta = R_{кТ} - \sqrt{R_к^2 - ((R_{кТ} - R_к) \cdot \cos \alpha)^2} + (R_{кТ} - R_к) \cdot \sin \alpha, \quad (4.1)$$

где  $\Delta$  – величина межэлектродного зазора, мм;  $R_{кТ}$  – радиус рабочей поверхности катода, мм;  $R_к$  – радиус круга, мм;  $\alpha$  – величина угла, град.

Обычно радиус рабочей поверхности катода принимается примерно равным максимальному радиусу круга. В этом случае, как свидетельствуют данные, представленные на рисунке 4.6, наблюдается достаточно резкая зависимость зазора  $\Delta$  от величины угла  $\alpha$ .

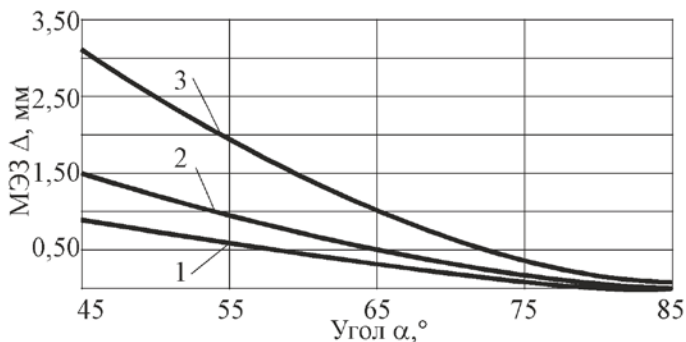


Рисунок 4.6 – Зависимость  $\Delta = f(\alpha, t)$  при условии, что  $R_{кТ} = R_{к\max} = 125$  мм, а алмазоносный слой полностью изношен  
 $1-t=3$  мм;  $2-t=5$  мм;  $3-t=10$  мм

Поэтому с точки зрения уменьшения перепада величин МЭЗ необходимо снижать длину дуги электрического контакта катода с кругом за счет соответствующего уменьшения размера катода. Однако такой путь ведет к снижению величины силы тока в цепи управления, а, следовательно, ограничению технологических возможностей процесса шлифования.

В тоже время данные, приведенные на рис. 4.7, свидетельствуют о том, что необходимо стремиться к использованию кругов с малой толщиной алмазоносного слоя, что, как правило, повышает себестоимость процесса обработки.

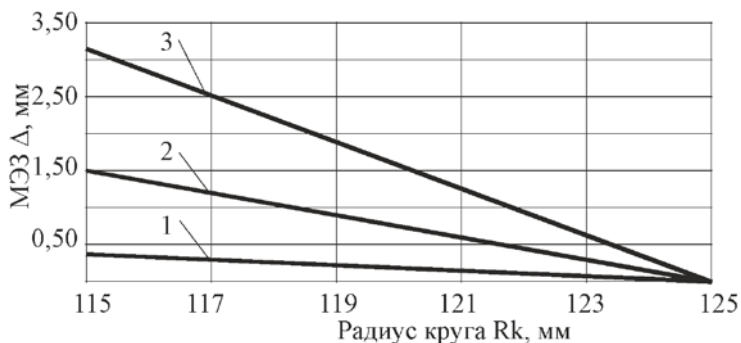


Рисунок 4.7 – Зависимость  $\Delta = f(R_k, \alpha)$  при условии, что  $R_{кТ} = 125$  мм  $1-\alpha=45^\circ$  мм;  $2-\alpha=60^\circ$  мм;  $3-\alpha=75^\circ$  мм

На рис. 4.8 представлена конструкция устройства, которая позволяет разрешить отмеченное противоречие (А. с. №1454592).

Как видно из рисунка 4.8, устройство содержит составной катод, состоящий из центрального сегмента 1 и соединенных с ним через ролики 2 с помощью кольцевых пружин 3 боковых сегментов 4 и 5. Центральный сегмент 1 жестко связан с передней и задней панелями 6, к которым в верхней части закреплена гайка 7.

Сегменты 4 и 5 имеют наклонные наружные поверхности, с которыми контактируют ролики 8, закрепленные на вилке 9 с возможностью вращения. В центральной части вилки 9 закреплена дополнительная гайка 10, которая вместе с гайкой 7 навинчена на винт 11. Винт имеет два участка с различными шагами резьбы, соответствующими гайкам 7 и 10, и кинематически связан с двигателем-редуктором 12, который неподвижно закреплен относительно станка. Причем гайка 10 имеет больший шаг резьбы, чем гайка 7. Электролит подается в зону обработки через коллектор 13 и отверстия в передней панели 6 и зазоры между сегментами. Положительный полюс источника тока подключается к шлифовальному кругу 14, а отрицательный - к сегментам 1, 4, 5.

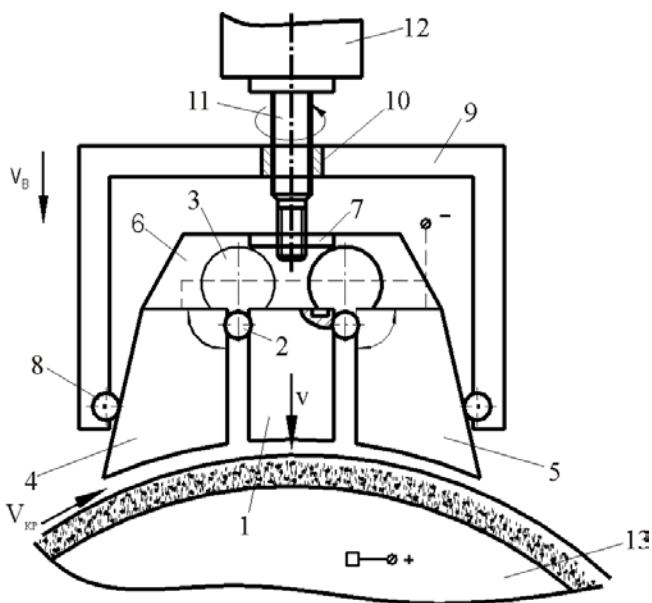


Рисунок 4.8 – Устройство для электрохимического управления рельефом периферийных кругов

Точность РПК периферийного круга зависит в данном случае от длины дуги рабочей поверхности одного сегмента. Соответствие перемещения катода к кругу и поворота боковых сегментов достигается выбором шагов резьбы на различных участках винта и угла наклона наружных поверхностей боковых сегментов катода. Месторасположение опорного шарнира бокового сегмента выбирается в зависимости от жесткости пружины и прилагаемого усилия к боковым сегментам катода.

Устройство работает следующим образом. Винту 11 сообщается вращение от реверсивного электродвигателя-редуктора 12 (управляемого блоком автоматики, см. рис. 4.3), при этом гайка 7 свинчивается с винта 11, что приводит к перемещению всего катода в направлении круга до того момента, пока не установится требуемый зазор между кругом 14 и рабочими поверхностями сегментов 1, 4, 5 катода. Одновременно с гайкой 7 с винта 11 свинчивается гайка 10, но с большей скоростью, так как на соответствующем ей участке винт имеет более крупный шаг.

Вместе с гайкой 10 к кругу перемещается вилка 9, которая своими роликами скользит по поверхностям боковых сегментов катода и осуществляет их поворот относительно центрального сегмента, что способствует обеспечению равномерности величины МЭЗ. Кольцевые пружины 3 обеспечивают обратный, согласованный с величиной перемещения катода, поворот боковых сегментов 4 и 5 при реверсе катодного устройства.

#### **4.2.4. Реализация процесса применительно к плоскошлифовальным станкам с вертикальным шпинделем, работающим торцовыми кругами**

Он реализуется на заточных, а также плоскошлифовальных станках с вертикальным расположением шпинделя и имеет ряд существенных преимуществ и, особенно при обработке хрупких материалов. Однако для его широкого внедрения в производство необходимо решение двух основных задач. Во-первых, это разработка рациональных конструкций автономных правящих устройств и особенно применительно к обработке диэлектрических материалов. При этом следует исходить из того, что применение автономного катодного устройства, занимающего часть РПК, весьма нежелательно, т.к. как это неизбежно ведет к снижению технологических возможностей процесса шлифования. Во-вторых, создание условий для устойчивого протекания процесса управляющего воздействия на связку токопроводящего круга в зоне управления.

На рис. 4.9 представлена принципиальная схема способа, в котором впервые в качестве устройства для управления РПК предложено выполнять катод в виде перфорированного элемента, перфорации которого расположены над зажимными элементами для размещения в них заготовок.

Другими словами, автономным правящим катодом служит свободная от обрабатываемых изделий часть приспособления (в данном случае сепаратора).

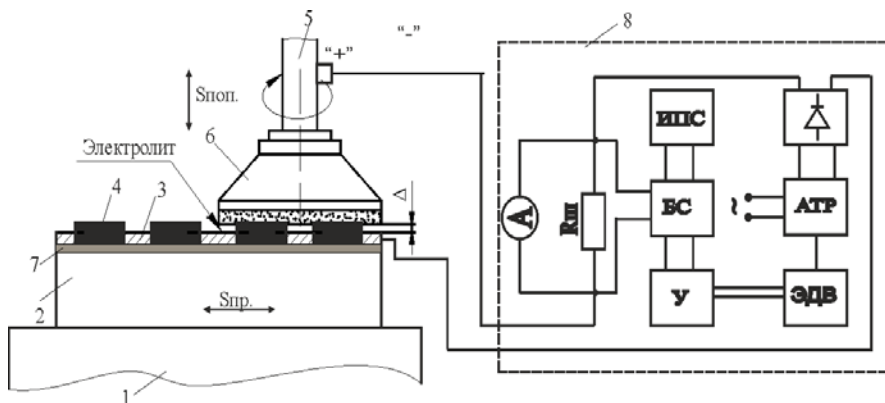


Рисунок 4.9 – Схема плоского торцевого шлифования со стабилизацией управляющего воздействия на РПК

Сепаратор 3 установлен на магнитной плите 2 станка и подключен к отрицательному полюсу источника постоянного тока. Алмазный круг 6 соединен при этом с положительным полюсом источника питания. Как видно из рисунка, обрабатываемые заготовки 4 устанавливаются с определенным вылетом над сепаратором-катодом, который определяет величину зазора  $\Delta$ . Столу станка 1 сообщается движение рабочей подачи, а кругу 6 - вращательное движение.

После подачи электролита в межэлектродный зазор (а, следовательно, и в зону обработки) электрическая цепь замыкается и производится активизация рабочей поверхности круга за счет дозированного электрохимического растворения его металлической связки. На станке также может использоваться стабилизирующая автоматическая система.

Согласно этой схеме текущий электрический сигнал с шунта сопротивлением  $R_{ш}$  и заданный сигнал с источника стабилизированного напряжения (ИПС) поступают в блок сравнения (БС), а результирующий сигнал усиливается электронным усилителем (У). В зависимости от полярности этого сигнала реверсивный электродвигатель (ЭДВ) меняет направление вращения. В данном случае изменять величину зазора  $\Delta$  за счет перемещения катода нет возможности. Поэтому регулирование плотности тока производится путем изменения технологического напряжения. Это выполняется с помощью специального механизма, например, на базе автотрансформатора (АТР). Последний либо увеличивает, либо уменьшает напряжение источника питания, которое после выпрямления подается на электроды (круг 6 и катод-сепаратор 3).

Таким образом, отличительным признаком предложенного способа является реализация принципа совмещения функций зоны закрепления

обрабатываемых пластин, шлифования и электро-физико-химического воздействия на рабочую поверхность круга. При этом зоны шлифования и управления постоянно чередуются, как бы взаимно прерывая друг друга.

#### 4.2.5. Реализация процесса применительно к профильному шлифованию периферийными кругами

Известно, что особые трудности возникают в случае профилирования и поддержания необходимого состояния РПК со сложным профилем. Основываясь на теоретическом анализе, был предложен способ, в основу которого положены пять главных принципов: 1) – применение мелкозернистых алмазных кругов, в результате чего обеспечивается возможность реализации малых значений зазора  $\Delta$ ; 2) – использование кругов с предварительно сформированным профилем, что позволяет считать площадь в зоне управления величиной постоянной; 3) – обеспечение равновесного межэлектродного зазора  $\Delta$  перед началом процесса шлифования за счет профилирования самого катода рабочим кругом на обратной полярности; 4) – учет изменения электропроводности электролита в процессе управления РПК; 5) – использование автоматической следящей системы. Схема способа представлена на рисунке 4.10.

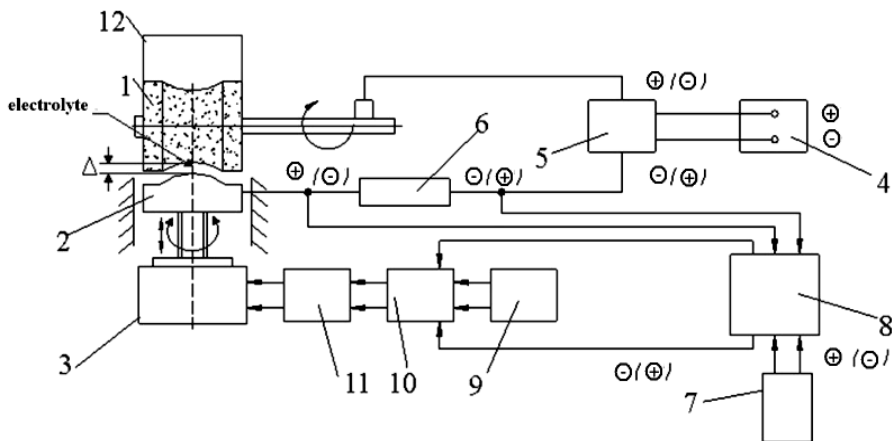


Рисунок 4.10 – Схема профилирования и управления РПК круга со сложным профилем

- 1-алмазный круг; 2-катод; 3-реверсивный электродвигатель;
- 4-источник постоянного тока; 5-реверсивный переключатель; 6-шунт;
- 7-датчик электропроводности электролита; 8-сумматор;
- 9-источник стабилизированного напряжения; 10-блок сравнения;
- 11-электронный усилитель; 12-деталь

Его характерная особенность заключается в том, что перед формообразованием токопроводящего круга 1 (уже имеющего заданный точный профиль) включают «обратную» полярность (круг - «минус», а катод - «плюс») источника тока 4 и с помощью этого круга правят рабочую поверхность катода 2, предварительный профиль которой близок к своему окончательному состоянию.

При этом режимы электрохимического воздействия на катод 2, установленный на направляющих, аналогичны рабочим режимам профилирования круга 1.

Такой подход позволяет решить две важные задачи: во-первых, получить необходимый профиль катода (который расчетным методом получить довольно сложно) с одновременной компенсацией различного рода погрешностей (например, погрешность установки), а во-вторых, обеспечить равновесный межэлектродный зазор. По мере износа круга зазор  $\Delta$  поддерживается неизменным с помощью реверсивного электродвигателя 3, управляемого блоком автоматики, что также не допускает возможности искажения профиля рабочей поверхности катода в результате его соприкосновения с кругом.

Управление РПК производится в автоматическом режиме.

Результирующий сигнал с блока сравнения 10 усиливается и подается на электродвигатель.

В зависимости от полярности этого сигнала, электродвигатель вращается в ту или другую сторону, поддерживая (по мере износа круга и изменения электропроводности электролита) величину зазора  $\Delta$  в заданных пределах. Описанные выше способы прошли проверку на практике и подтвердили высокую эффективность предложенных технических решений.

### **4.3. Алмазное шлифование с вибрациями и управлением параметрами РПК**

#### **4.3.1. Основные предпосылки для усовершенствования управляемого процесса шлифования ПСТМ**

Выполненные исследования позволили выявить важную физическую особенность процесса шлифования ПСТМ, заключающуюся в периодичности изменения значений выходных показателей обработки. Это связано с периодическим образованием и разрушением площадок износа на алмазных зернах. Так, например, при обработке синтетического поликристаллического алмаза типа АСБ 5 эта картина представлена на рисунке 4.11. Как видно из рисунка, увеличение силы тока от 35 до 125 А уменьшает период следования пульсаций, а в случае когда величина тока достигает  $I = 150$  А, процесс шлифования стабилизируется.

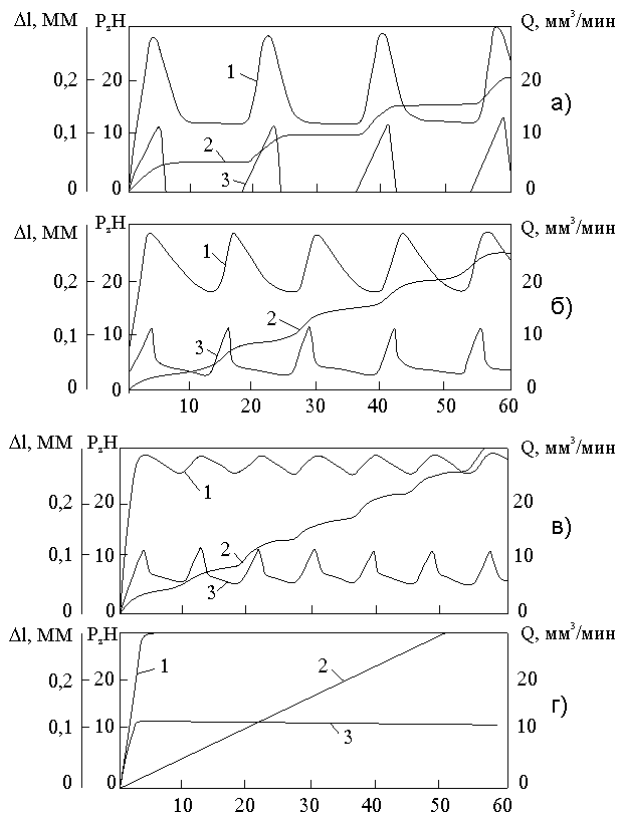


Рисунок 4.11 – Влияние силы тока на периодичность процесса шлифования на силу резания  $P_z$  (1), линейный съём  $\Delta l$  (2) и производительность  $Q$  (3) (условия обработки: круг 12A2-45° 150x10x3x32 AC6 125/100 ПМ12 100%

$$V_k=30\text{м/с}; P_n=2,5\text{МПа}; S_{np.}=0,6\text{ м/мин}) [12]$$

а) -  $I=35\text{А}$ ; б) -  $I=55\text{А}$ ; в) -  $I=125\text{А}$ ; г) -  $I=150\text{А}$

Изложенное выше позволяет заключить, что периодичность изменения параметров режущего рельефа круга является фактором, ограничивающим производительность шлифования и приводящим к росту удельного расхода алмазов круга. Периодичность процесса обработки свидетельствует о недостаточно полном использовании режущего ресурса алмазного круга. Ее устранение путем соответствующего подбора величины скорости принудительного удаления связки круга не позволяет достаточно эффективно

решить эту задачу, т.к. значительное число зерен выпадает из связки. Следовательно, путь, направленный на обеспечение возможности непрерывного самозатачивания зерен круга при одновременном увеличении их числа в контакте с ПСТМ (за счет работы при малой высоте выступания зерен над уровнем связки), является достаточно перспективным, поскольку это должно существенно повысить производительность шлифования при высоком коэффициенте использования режущего ресурса алмазных зерен.

Это означает, что устойчивость выходных показателей высокопроизводительной обработки ПСТМ обеспечивается неустойчивой рабочей поверхностью круга, т.е. алмазные зерна могут эффективно шлифовать ПСТМ только тогда, когда сами будут разрушаться с оптимальной интенсивностью, сохраняя необходимую развитость своего микро- и субмикрорельефа. В связи с этим представляет интерес вопрос использования дополнительных механических колебаний для принудительного формирования режущего рельефа РПК. Эти колебания могут вводиться в зону шлифования (рис. 4.12, а), в автономную зону (рис. 4.12, б) или обе зоны одновременно.

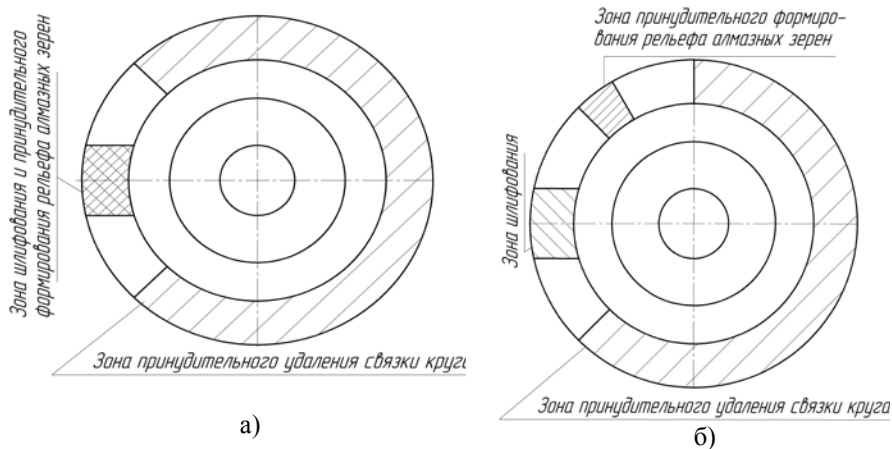


Рисунок 4.12 – Схемы расположения зон шлифования, принудительного формирования режущего рельефа РПК и принудительного удаления связки круга

Установлено, что если, например, в процессе шлифования ПСТМ приложить дополнительную нагрузку  $R_{доп.}$ , то процесс самозатачивания зерен начнется при меньшем значении их высоты выступания, а, следовательно, при большем числе их в контакте с деталью.

Контрольные эксперименты показали, что наиболее эффективно этот процесс реализуется в случае приложения дополнительной нагрузки с некоторым ударом: производительность обработки существенно повышается при одновременном снижении расхода алмазов круга и себестоимости обработки (рис. 4.13). В связи с этим был предложен способ шлифования ПСТМ с переменным давлением в контакте, осуществляемый путем целенаправленного периодического изменения усилия прижатия образца к кругу.

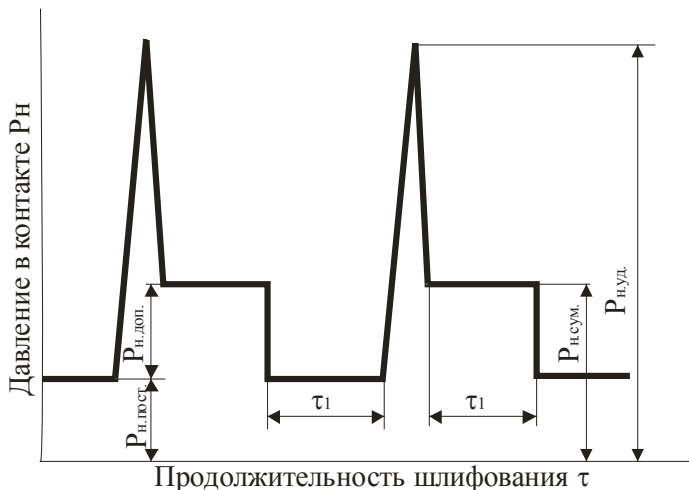


Рисунок 4.13 – Схема изменения давления в контакте ПСТМ с алмазным кругом в процессе шлифования

#### 4.3.2. Шлифование с введением в зону обработки инфразвуковых колебаний

Установлено, что достаточно хорошие результаты могут быть получены даже в случае, когда изменение усилия (а, следовательно, и давления в контакте) производится с инфразвуковой частотой. Суть способа заключается в следующем (рис. 4.13). Вначале в течение времени  $\tau_1$  производят шлифование с постоянным давлением в контакте  $P_{\text{пост.}}$ , затем с некоторым ударом прикладывают дополнительную нагрузку  $P_{\text{доп.}}$ , создавая таким образом давление в контакте  $P_{\text{н.уд.}}$ , после чего в течение времени  $\tau_2$  осуществляют обработку с суммарным давлением в контакте  $P_{\text{н.сум.}}$ , которое вызвано совместным действием постоянной и дополнительной нагрузок.

По истечении времени дополнительную нагрузку снимают, и процесс повторяют вновь. На рисунке 4.14 представлена одна из возможных схем устройства, реализующего предложенный способ.

Постоянное давление ( $P_{н.пост.}$ ) в зоне контакта обрабатываемого ПСТМ 3 с рабочей поверхностью алмазного круга 1 осуществляется с помощью груза 6 через плунжеры 4 и 5. Дополнительный груз 7 (создающий дополнительное давление  $P_{н.доп.}$ ), установленный на направляющих качения, перемещается в верхнее положение с помощью специального кулачка 8, который приводится во вращение электродвигателем 10 через редуктор 9. Профиль кулачка выполнен таким образом, что перемещение груза 7 вниз осуществляется путем его практически свободного падения. Во время подъема груза 7 обрабатываемый ПСТМ подвергается обработке при величине давления в контакте  $P_{н.пост.}$  в течение времени  $\tau_1$ . Однако как только штанга толкателя выйдет из контакта с кулачком 8, начинается перемещение груза 7 с ускорением, близким к ускорению свободного падения, в результате чего он ударяет по грузу 6, что создает определенную величину мгновенного (ударного) давления в контакте  $P_{н.уд.}$ . Затем в течение времени  $\tau_2$  шлифование осуществляется с суммарным давлением  $P_{н.сум.}$ , которое обеспечивается одновременным действием грузов 6 и 7. После этого вновь производится подъем груза 7 и процесс повторяется.

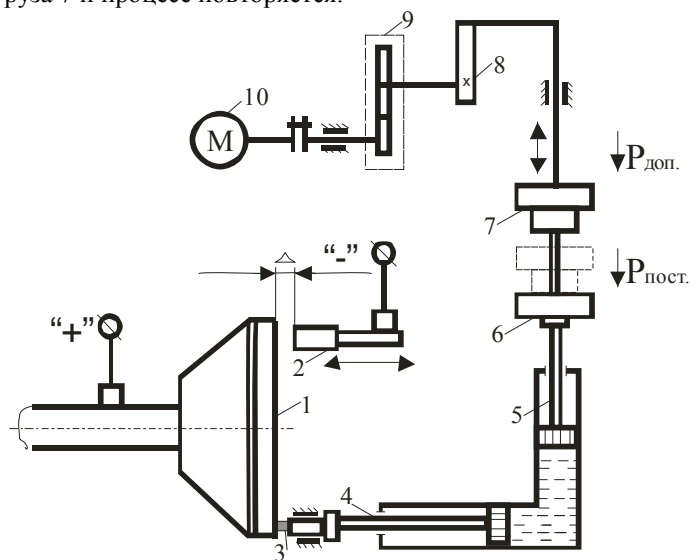


Рисунок 4.14 – Схема реализации способа шлифования ПСТМ с переменным давлением в контакте:

- 1 - алмазный круг; 2 - автономный катод; 3 - обрабатываемый ПСТМ; 4, 5 - плунжеры; 6, 7 - грузы; 8 - кулачок; 9 - редуктор; 10 - электродвигатель

Основным назначением ударного приложения дополнительной нагрузки является создание в зоне шлифования условий, способствующих активации

процесса микроразрушения зерен и исключая образование на них площадок износа или существенно уменьшающих период времени, в течение которого они существуют.

Регулировка величины давления в контакте в момент удара может осуществляться как путем подбора соответствующего веса дополнительного груза, так и высоты (амплитуды) его падения.

Разработанный вариант устройства оказался весьма удобным для установления необходимых параметров приложения ударной нагрузки при проведении лабораторных исследований.

Были проведены сравнительные испытания работоспособности одного и того же круга с постоянным и переменным давлением в контакте. Шлифование производилось при выключенной цепи управления (собственно алмазное шлифование). Эффективность предложенного способа шлифования наглядно иллюстрируется данными, представленными на рис. 4.15, которые подтверждают факт возможности существенного повышения производительности обработки и снижения удельного расхода алмазов круга (в данном случае примерно в 2 раза).

Объяснить это явление можно, используя зависимость рабочей высоты зерен от условий и продолжительности шлифования.

Если при шлифовании с постоянной нагрузкой процесс обработки прекращается при высоте зерен  $H=60\text{мкм}$ , то во втором случае лишь при  $H=30\text{ мкм}$ . Это означает, что не только увеличилось число зерен в контакте с ПСТМ, но вырос и коэффициент их использования. В то же время общий характер протекания процесса не меняется: через определенное время (в данном случае  $\approx 15\text{мин}$ ) процесс самозатачивания зерен становится невозможным и съём припуска с ПСТМ затухает. Увеличение дополнительной нагрузки позволяет снова активизировать режущую способность круга (рис. 4.16, кривая 3).

Однако через некоторое время процесс шлифования вновь трансформируется в процесс трения пары «обрабатываемый ПСТМ - алмазные зерна», имеющей чрезвычайно высокую износостойкость.

При определенной величине нагрузки  $P_{\text{доп}}$  может наступить момент, когда все зерна, находящиеся на рабочей поверхности круга, войдут в контакт с ПСТМ. При этом неизбежен контакт поликристалла со связкой круга.

В этих условиях для обеспечения самозатачивания круга необходимы высокие силовые нагрузки, что недопустимо с позиции обеспечения требуемого качества обработки ПСТМ.

Следовательно, только в условиях непрерывного управления режущим рельефом круга (интегрированные процессы шлифования) можно осуществлять процесс активации его режущей поверхности при величинах нагрузок в зоне шлифования, допустимых с точки зрения исключения растрескивания и расслаивания ПСТМ.

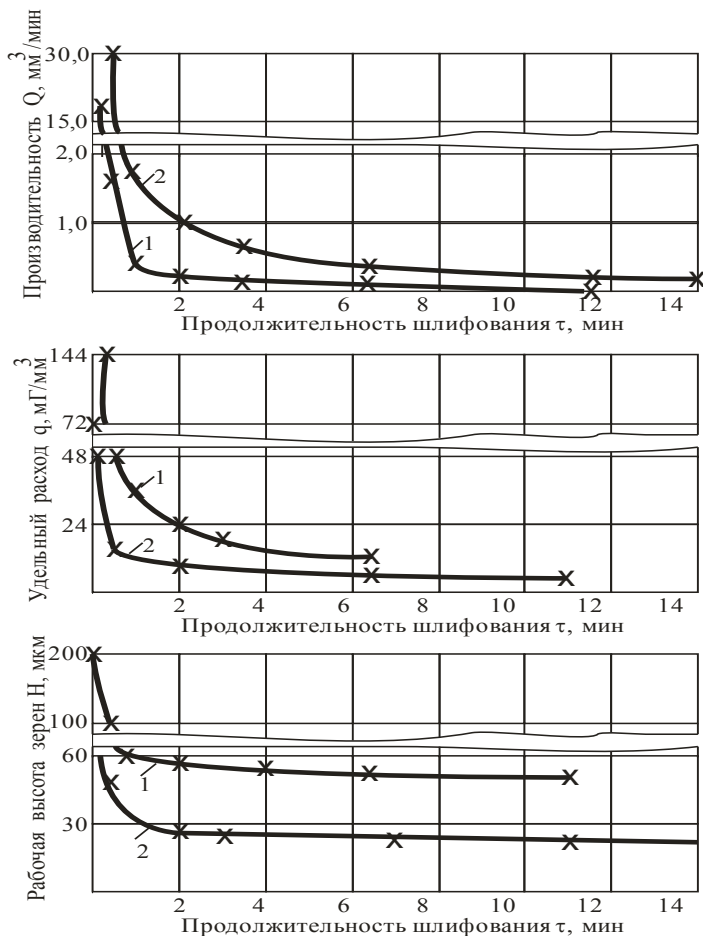


Рисунок 4.15 – Выходные показатели процесса шлифования ПСТМ диамет с постоянным (1) и переменным (2) давлениями в контакте. Условия обработки:

круп 12A2-45° 150x10x3x32 AC6 160/125 M1-01 100 %;  $V_k = 20$  м/с;

$$S_{пр.} = 1 \text{ м/мин}; I = 0 \text{ А};$$

1-  $P_n = 1,3$  МПа; 2-  $P_{н.лост.} = 1,3$  МПа;  $P_{доп.} = 50$  Н;  $P_{н.сум.} = 2,6$  МПа;  $f = 5$  Гц;

$$A = 6 \text{ мм}$$

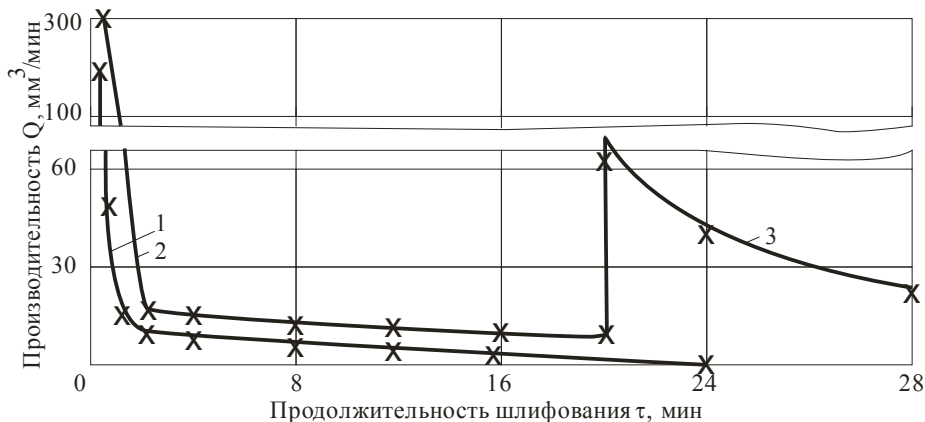


Рисунок 4.16 – Показатели процесса шлифования ПСТМ К10Д с постоянным и переменным давлением в контакте.

Условия обработки: круг 12A2-45° 150x10x3x32 AC6 160/125 M1-01 100 %,  $V_k = 20$  м/с;  $S_{np.} = 1$  м/мин;  $I = 0$  А;  $S_k = 27$  мм<sup>2</sup>.

$$V_k = 20 \text{ м/с}; S_{np.} = 1 \text{ м/мин}; I = 0 \text{ А}; S_k = 27 \text{ мм}^2.$$

$$1 - P_n = 0,8 \text{ МПа}; 2 - P_{н.пост.} = 0,8 \text{ МПа}; P_{доп.} = 10 \text{ Н};$$

$$3 - P_{доп.} = 50 \text{ Н}; f = 5 \text{ Гц}; A = 6 \text{ мм}$$

В предложенном способе обработки ПСТМ с переменным давлением в контакте сохраняются все положительные качества, которыми обладает "упругая" схема шлифования.

Т.е. независимо от величины скорости удаления связки круга в автономной зоне давление в контакте изменяется по заданной программе и не может самопроизвольно увеличиваться до опасной величины (как это может произойти при использовании «жесткой» схемы шлифования), что позволяет гарантированно исключить брак ПСТМ, вызываемый условиями обработки.

Для проверки эффективности способа шлифования с переменным давлением в контакте в условиях управления режущим рельефом кругов были проведены соответствующие эксперименты (рис. 4.16): 1) шлифование с постоянным давлением в контакте при  $P_{пост.} = 70$  Н ( $P_{доп.} = 0$ ); 2) шлифование с переменным давлением в контакте при  $P_{пост.} = 30$  Н,  $P_{доп.} = 40$  Н ( $P_{сум.} = 70$  Н, предложенный способ); 3) шлифование с постоянным давлением при  $P_{пост.} = 100$  Н.

В первом и последнем случаях давления в контакте были умышленно выбраны соответственно равным и большим, чем суммарное давление во втором случае.

Как видно из данных, представленных на рис. 4.17, предложенный способ шлифования обеспечивает повышение производительности обработки примерно в 1,8 и в 1,3 раза по сравнению со шлифованием по первому и третьему способам соответственно. Удельный расход алмазов снизился соответственно в 1,9 и в 1,2 раза. В целом это позволило уменьшить себестоимость обработки соответственно в два и 1,2 раза. Следовательно, такой процесс может быть эффективно применен для шлифования ПСТМ, и особенно на основе алмаза, обладающих самой высокой трудоемкостью обработки.

Основываясь на полученных положительных предварительных результатах, было сделано предположение, что в условиях интегрированных процессов шлифования влияние условий приложения дополнительной нагрузки на выходные показатели предложенного способа шлифования (в отличие от обычного шлифования) должно быть более активным.

Основными параметрами условий приложения дополнительной нагрузки являются ее величина  $P_{доп.}$ , амплитуда  $A$  и частота  $f$ .

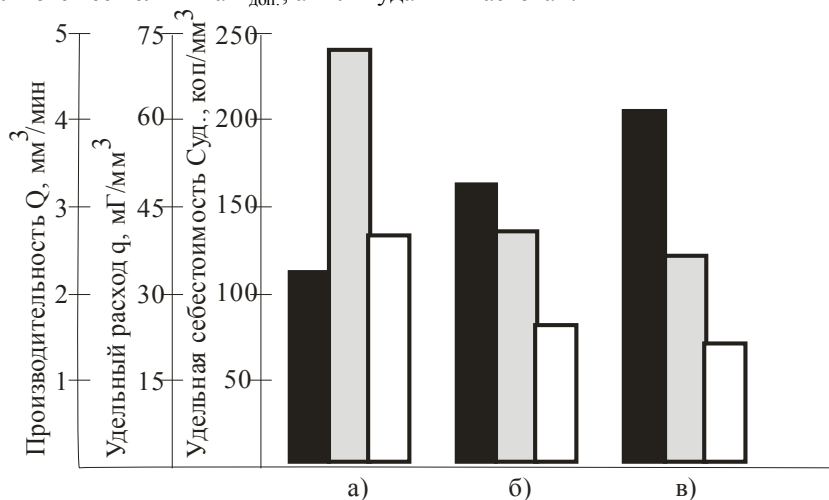


Рисунок 4.17 – Выходные показатели процесса шлифования СКМ-Р с постоянным (а, б) и переменным (в) давлением в контакте:

■ -  $Q$ ; ■ -  $q$ ; □ -  $C_{уд.}$

Условия обработки: круг 12A2-45° 150x10x3x32 AC6 160/125  
 M1-01 100 %,  $V_k = 20$  м/с;  $S_{np.} = 1$  м/мин;  $I = 70$  А;  $S_k = 20$  мм<sup>2</sup>.

а) -  $P_{пост.} = 70$  Н; б) -  $P_{пост.} = 100$  Н; в) -  $P_{пост.} = 40$  Н;

$P_{доп.} = 30$  Н;  $f = 5$  Гц;  $A = 6$  мм

Поскольку они определяют интенсивность воздействия на алмазные зерна круга, то их роль в процессе шлифования в сочетании со скоростью удаления связки круга в автономной зоне должна быть определяющей.

Можно предположить, что увеличение значений, названных выше показателей будет приводить к повышению эффективности процесса. Это подтверждается данными, представленными на рисунках 4.18 - 4.20.

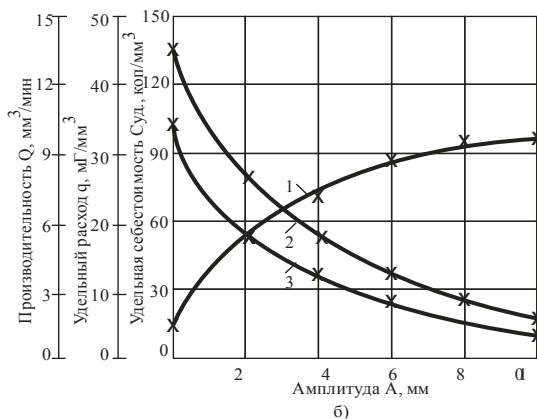
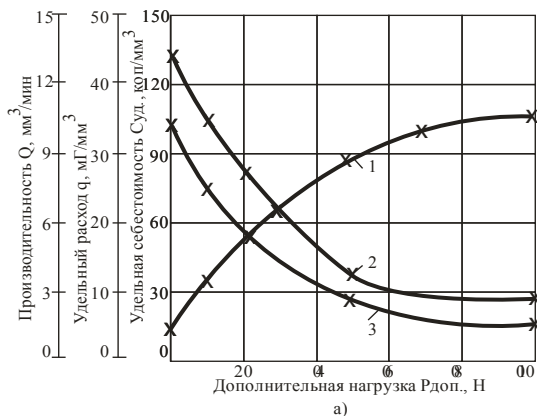


Рисунок 4.18 – Влияние величины (а) и амплитуды (б) нагрузки в условиях шлифования ПСТМ диамет с переменным давлением в контакте:

1-  $Q$ ; 2-  $q$ ; 3-  $S_{уд}$ .

Условия обработки: круг 12A2-45° 150x10x3x32 AC6 100/80 M1-01 100 %,  $V_k = 20$  м/с;  $S_{пр} = 1$  м/мин;  $I = 55$  А;  $S_k = 37$  мм<sup>2</sup>.

а) -  $P_{н.пост.} = 1,3$  МПа; б) -  $P_{доп.} = 50$  Н;  $f = 5$  Гц;  $A = 6$  мм

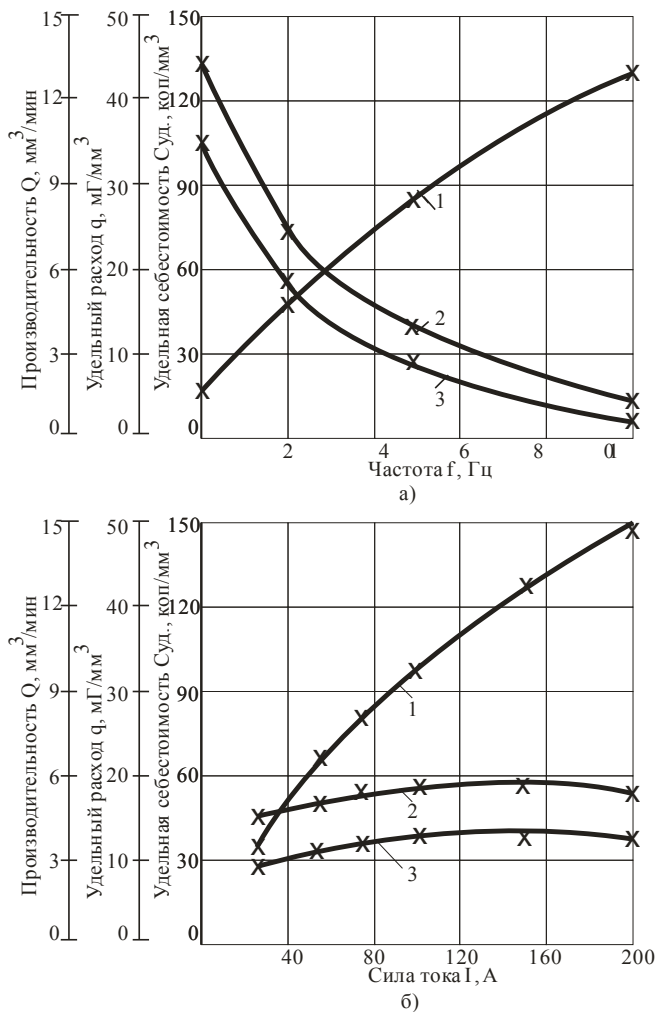


Рисунок 4.19 – Влияние частоты изменения дополнительной нагрузки (а,  $Z=100/80$ ) и силы тока в цепи управления (б,  $Z=160/125$ ) на выходные показатели обработки ПСТМ диаметр: 1 -  $Q$ ; 2 -  $q$ ; 3 -  $C_{уд}$ .

Условия обработки: круг 12A2-45° 150x10x3x32 AC6 100/80 M1-01 100 %,  $V_k = 20$  м/с;  $S_{np} = 1$  м/мин;  $I = 55$  А;  $S_k = 37$  мм<sup>2</sup>.  $P_{н.пост.} = 1,3$  МПа;

$$P_{доп.} = 50 \text{ Н}; f = 5 \text{ Гц}; A = 6 \text{ мм}$$

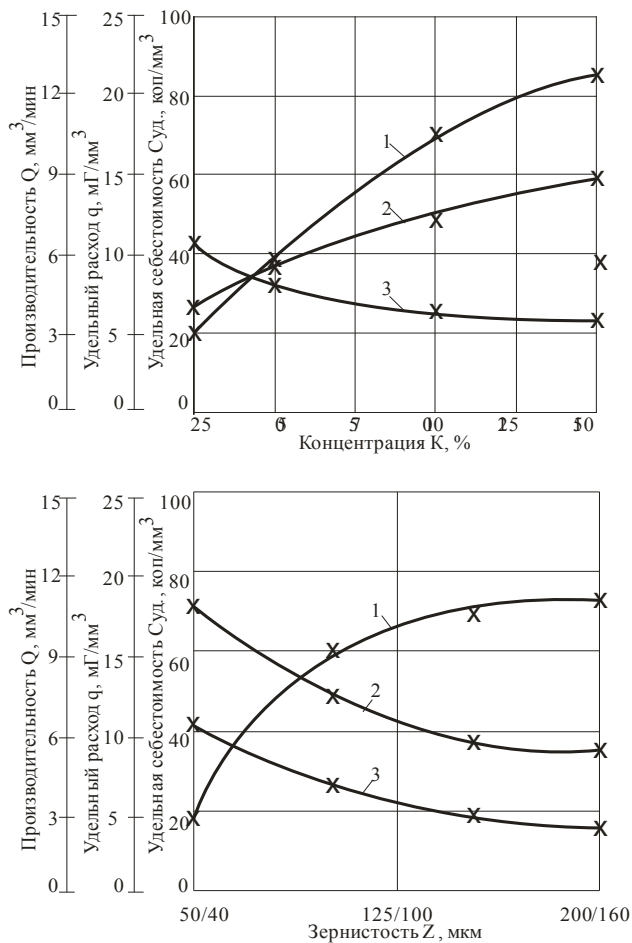


Рисунок 4.20 – Влияние характеристики круга на выходные показатели обработки ПСТМ диамет: 1-  $Q$ ; 2-  $q$ ; 3-  $C_{уд}$ . а) –  $Z = 160/125$ ; б) –  $K = 100\%$ .

Условия обработки: круг 12A2-45° 150x10x3x32 AC6 100/80 M1-01 100 %,  $V_K = 20$  м/с;  $S_{np.} = 1$  м/мин;  $I = 55$  А;  $S_K = 87$  мм².

$P_{н.пост.} = 1,3$  МПа;  $P_{дон.} = 50$  Н;  $f = 5$  Гц;  $A = 6$  мм

В частности, рост величины дополнительной нагрузки с 0 до 100Н (рис. 4.18, а) приводит к повышению производительности шлифования с 1,5 до 10,5 мм<sup>3</sup>/мин, т.е. в 7 раз, при одновременном снижении удельного расхода алмазов круга с 45 до 9 мг/мм<sup>3</sup>, т.е. в 5 раз. В результате этого удельная себестоимость процесса падает с 10,5 до 1,5 коп/мм<sup>3</sup>, т.е. примерно в 7 раз. Аналогичные результаты получены и при увеличении амплитуды А, что вполне закономерно, поскольку с ее ростом изменяется мгновенное давление в контакте Р<sub>н.уд.</sub> аналогично изменению Р<sub>доп.</sub> при А= const (рис. 4.18, б).

Наиболее эффективное влияние на процесс шлифования оказывает частота f приложения дополнительной нагрузки (рис. 4.18, а). Ее увеличение с 0 до 10 Гц обеспечивает рост производительности с 1,5 до 12,7 мм<sup>3</sup>/мин. Это можно объяснить более стабильным микроразрушением алмазных зерен, что подтверждается исследованиями периодичности изменения физических и технологических показателей обработки во времени, которая наиболее быстро вырождается именно с увеличением частоты приложения нагрузки.

Здесь необходимо отметить, что, хотя периодичность имеет место и в данном процессе, она носит значительно менее выраженный характер, что свидетельствует об интенсификации процесса микро - и макроразрушения алмазных зерен. Что касается q и С<sub>уд.</sub>, то в этом диапазоне частот их значения снижаются примерно в 10 раз. Дальнейшее увеличение частоты при больших значениях амплитуды было ограничено возможностью механической системы.

Значительный интерес представляет влияние частоты колебаний, силы тока в цепи управления (рис. 4.19) и характеристики алмазного круга (рис. 4.20) на выходные показатели предложенного процесса.

Особое внимание в процессе шлифования с переменным давлением в контакте следует уделить силе тока в цепи управления, поскольку, как подчеркивалось выше, эффективность его проявляется только лишь при условии непрерывного удаления связки алмазного круга. Установлено, что отличительной особенностью процесса шлифования ПСТМ с переменным давлением в контакте является то, что удельный расход алмазов круга находится в меньшей зависимости от величины силы тока в цепи управления. Так, например, в диапазоне значений силы тока I = 25-200 А при I = 200 А q = 9-11 мг/мм<sup>3</sup>, рис. 4.19, б), в то время как производительность обработки резко возрастает (с 5мм<sup>3</sup>/мин до 25мм<sup>3</sup>/мин).

Таким образом, можно сказать, что в данном случае имеет место совпадение оптимальных значений производительности и удельного расхода алмазов круга, а, следовательно, и себестоимости обработки (С<sub>уд.</sub>=2,5 коп/мм<sup>3</sup>), что на практике позволяет добиться резкого увеличения эффективности процесса.

Можно утверждать, что производительность обработки в данном случае приближается к ее величине, полученной в начальный период шлифования вскрытым кругом.

Характеристика алмазного круга при шлифовании с переменным давлением контакте оказывает такое же влияние, как и в обычном процессе: с ростом концентрации (рис. 4.20, а) увеличивается производительность обработки и удельный расход круга при одновременном снижении себестоимости. Однако значения этих показателей в несколько раз лучше, чем в обычном процессе шлифования.

Зернистость круга наиболее заметное влияние на  $Q$ ,  $q$  и  $C_{уд.}$  оказывает в диапазоне значений  $Z = 50/40-160/125$ , после чего их значения стабилизируются (рис. 4.20, б). Рост производительности с 3 до 10,5 мм<sup>3</sup>/мин и снижение  $q$  и  $C_{уд.}$  (соответственно с 17,5 до 9 мг/мм<sup>3</sup> и с 4 до 1,8 коп/мм<sup>3</sup>) с ее увеличением подтверждает установленную ранее особую роль зернистости в управляемом процессе шлифования [15].

Она состоит в том, что уменьшение  $Z$  при неизменной концентрации алмазов в круге снижает интенсивность самозатачивания зерен путем микроразрушения.

Таким образом, высокая эффективность процесса шлифования ПСТМ с переменным давлением в контакте позволяет рекомендовать его для широкого использования в практических условиях, что требует установления оптимальных условий его реализации.

Учитывая тот факт, что увеличение всех параметров условий обработки однозначно ведет к снижению себестоимости процесса при одновременном росте производительности шлифования, можно рекомендовать в качестве оптимальных максимально возможные значения этих параметров с учетом накладываемых на них ограничений по браку ПСТМ из-за растрескивания и расслаивания, а также возможности практической реализации. Для общих условий обработки (круг 12А2-45° 150x10x3x32 АС6 М2-01;  $V_k = 20-30$  м/с;  $S_{пр} = 1$  м/мин;  $P_{н.пост} = 1,3-2,5$  МПа;  $S_k = 37$  мм) эти параметры имеют следующие значения:  $P_{доп.} = 5$  0-60 Н ( $P_{н.доп.} = 1,5-2,0$  МПа);  $A = 5-6$  мм;  $f = 10$  Гц;  $I = 180-200$  А;  $Z = 160/125-200/160$ ;  $K = 100-150\%$ .

#### **4.3.3. Управляемый процесс шлифования с дополнительным наложением ультразвуковых колебаний**

Выполненные исследования по влиянию частоты механических колебаний на показатели процесса шлифования позволили предположить, что перспективным направлением повышения производительности и улучшения качества поверхности при алмазно-абразивной обработке является введение в зону резания ультразвуковых колебаний (УЗК) малой амплитуды. Ультразвуковые колебания оказывают положительное влияние не только на силы при микрорезании отдельными зернами и в целом на съем ОМ, но

оказывают щадящее воздействие на ПСТМ. Это способствует повышению эффективности абразивной обработки в целом [15].

Установлено, что общей закономерностью воздействия УЗК на различные процессы абразивной обработки является то, что сьем металла носит незатухающий характер и продолжается весь цикл обработки. Со временем он практически не меняется, к тому же инструмент не теряет своих режущих свойств, постоянно работая в режиме самозатачивания. Причиной этого является то, что УЗК интенсифицируют процесс разрушения и диспергирования режущих зерен, способствуя с одной стороны активному обновлению режущих микрокромки на их поверхностях, а с другой (при определенных условиях) и удалению их из связки. Благодаря этому засаливание рабочей поверхности кругов (РПК) практически отсутствует, производительность процесса не зависит от времени обработки. Соизмеримость амплитуд колебаний и толщин среза, а также скоростей при обработке повышают ее производительность до 3-4 раз при одновременном снижении износа инструмента.

#### **4.3.4. Моделирование процесса шлифования с наложением ультразвуковых колебаний**

Экспериментальные исследования ультразвуковой алмазно-абразивной обработки представляют определенную трудоемкость, а, следовательно, и являются дорогостоящими. В настоящее время весьма перспективным и эффективным расчетным методом исследования зоны резания является использование программных продуктов, основанных на методе конечных элементов [16, 17]. В связи с этим было проведено компьютерное 3D моделирование процесса ультразвукового шлифования с помощью прикладного пакета программ *CosmosWorks*, в основу которого положен метод конечных элементов (МКЭ). Идея метода состоит в моделировании реального объекта совокупностью конечных элементов (одномерных, двумерных, трехмерных), выполнении условий их сочленения, нагружения, закрепления и анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) такой конечноэлементной модели. При этом независимо от используемого программного обеспечения эффективный алгоритм создания модели может быть представлен последовательностью действий, вмещающей в себя шесть основных этапов:

При этом независимо от используемого программного обеспечения эффективный алгоритм создания модели может быть представлен последовательностью действий, вмещающей в себя 11 основных этапов:

1. Построение геометрической модели конструкции (или экспорт этой модели из конструкторского модуля). Используемые при этом элементы построения ранжируются по возрастанию приоритетов:  $pt \rightarrow cr \rightarrow sf \rightarrow vl$  (точка  $\rightarrow$  линия  $\rightarrow$  поверхность  $\rightarrow$  объем). В нашем

случае с использованием элементов VL создается трехмерная (3D) модель системы «алмазное зерно – покрытие – металлофаза–связка–обрабатываемый материал»

2. Выбор типа конечных элементов из библиотеки пакета для каждой зоны конструкции. Поскольку наиболее распространенной формой алмаза и продуктов его разрушения считается октаэдр именно он принимался формой 3D-конечных элементов.

3. Задание свойств материалов для каждой зоны конструкции. В качестве свойств материалов используется модуль упругости, коэффициент Пуассона, теплофизические свойства, зависящие от температуры, а так же пластическое поведение.

4. Задание геометрических характеристик элементов по зонам системы (в зависимости от выбранного типа элемента).

5. Построение конечноэлементной модели (разбиение конструкции на конечные элементы). На этом этапе, на базе геометрической модели, состоящей из точек, линий, поверхностей и объемов (pt, st, sf, vl), создается конечноэлементная модель, состоящая из узлов (nd) и элементов (el).

6. Проверка правильности построения конечноэлементной модели и ее корректировка (слияние совпадающих узлов, перенумерация узлов и элементов) (MERGE, COMPRESS).

7. Закрепление конечноэлементной модели (задание нулевых или других заданных перемещений). Производится в узлах, но может быть произведено с использованием атрибутов геометрической модели (точки, линии, поверхности), если они ассоциируются с соответствующими узлами.

8. Нагружение модели (сосредоточенными, распределенными нагрузками) по узлам, линиям и поверхностям. Конкретные возможности нагружения надо рассматривать применительно к определенной версии пакета.

9. Экспорт данных конечноэлементной модели в расчетный модуль. Этот этап выполняется, если модель строится и рассчитывается в разных модулях.

10. Расчет созданной конечноэлементной модели в конкретном расчетном модуле в зависимости от типа задачи.

11. Вывод и интерпретация результатов расчета (на экран, в выходной файл).

При изучении процесса вибрационного шлифования, прежде всего, необходимо определить влияние УЗК, прикладываемых к РПК во время шлифования, на НДС системы «связка - зерно - ОМ». Программный пакет *CosmosWorks* позволяет проводить трехмерное моделирование. Исходная 3D-модель «связка – алмазное зерно – ОМ» представлена на рисунке 4.21, а.

Заготовка и фрагмент связки представлялись в виде пластин, а алмаз с геометрией октаэдра. В пластине ОМ была создана канавка (след от зерна).

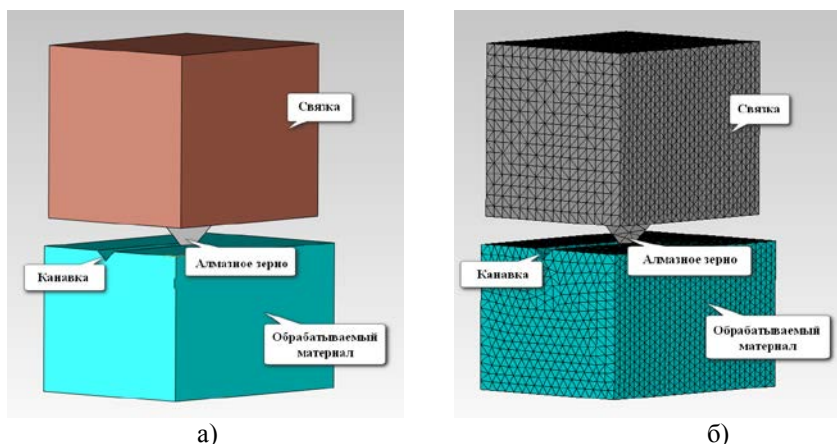


Рисунок 4.21 – Исходная (а) и конечноэлементная (б) 3D-модели системы «связка - зерно - ОМ»

Далее производилось генерирование сетки конечных элементов и ее сгущение в области контакта абразивного зерна с обрабатываемым материалом (рис. 4.21, б).

Затем были заданы физико-механические свойства всех элементов системы, представленные на рисунке 4.22. В исходной модели была использована связка на основе меди, в качестве обрабатываемого материала – алмаз, марка алмазного зерна принималась АС 100.

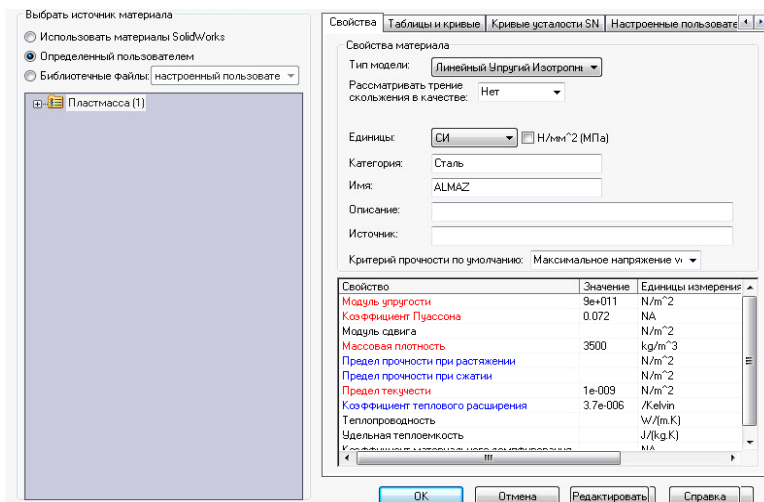


Рисунок 4.22 – Задание физико-механических свойств зерна марки АС100

Для задач как без использования УЗК, так и с их использованием все начальные условия были заданы одинаково, отличие состояло только в наличии или отсутствии ультразвуковых колебаний. При моделировании вибрационного шлифования усилие прижима алмазного шлифовального круга варьировали во времени.

Для этого усилие прижима задавалось как гармоническая нагрузка, график которой был создан заранее в виде синусоиды (рис. 4.23) с частотой  $10 \div 50$  кГц и амплитудой (A), выраженной в единицах давления.

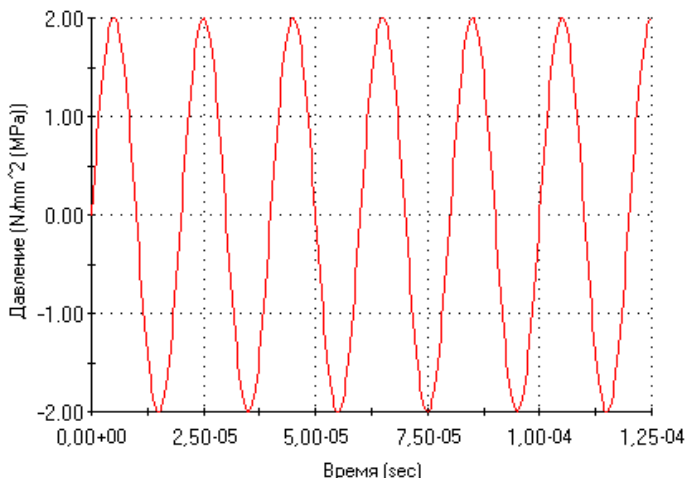


Рисунок 4.23 – График гармонической нагрузки ( $f = 50$  кГц,  $A = 2$  МПа)

#### **4.3.5. Влияние вибрационных колебаний на НДС зоны шлифования**

В исходной модели рассматривалось алмазное зерно марки АС100 зернистостью 200/160, обладающее следующими прочностными характеристиками:  $\sigma_{\text{раст.}} = 2,2$  ГПа;  $\sigma_{\text{сж.}} = 12,9$  ГПа [14].

В первой части расчетов задавалось усилие прижима (нормальная составляющая силы резания), реализующая давление на алмазное зерно равное 2 МПа, величина усилия, создаваемая тангенциальной составляющей силы резания, равная 1 МПа. В качестве обрабатываемого материала принят алмаз, а связка круга на основе меди (рис. 4.24). Для моделирования вибрационного шлифования усилие прижима задавалось с частотой колебаний  $f = 50$  кГц. Задачей исследования на данном этапе являлось определение влияния ультразвуковых колебаний на производительность шлифования путем определения НДС зоны обработки (рис. 4.25).

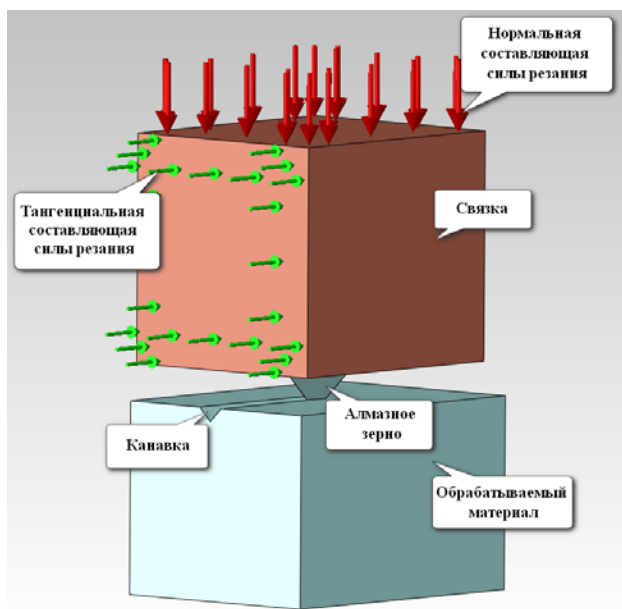


Рисунок 4.24 – Задание параметров нагружения 3D модели

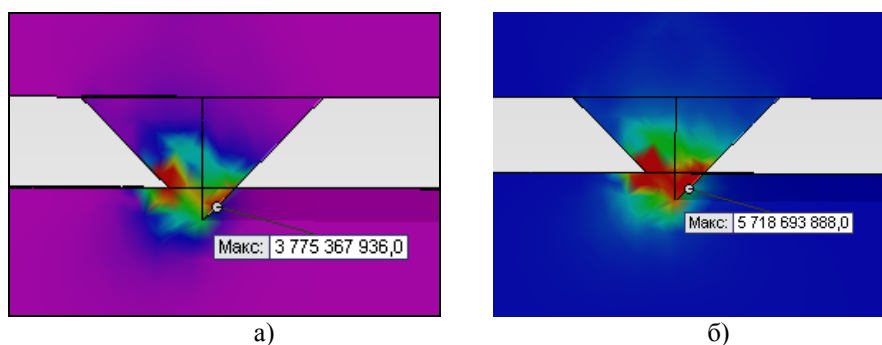


Рисунок 4.25 – Уровень  $\sigma_{\text{экв}}$  при шлифовании без УЗК (а) и с УЗК (б)

При этом в качестве косвенного параметра, характеризующего производительность, служила величина  $\sigma_{\text{экв}}$ .

На основании проведенных модельных экспериментов по определению НДС зоны шлифования можно сделать вывод о существенном влиянии УЗК на объем разрушенного материала.

Во второй части расчетов учитывалось влияние частоты УЗК на изменение величины эквивалентных напряжений. Условия эксперимента: обрабатываемый материал – алюминий, материал связки – на основе меди, усилие прижима 2 МПа, усилие создаваемое подачей 1 МПа. В первом случае обработка велась без введения УЗК, во втором и третьем с УЗК (частота колебаний  $f = 10$  кГц и  $f = 50$  кГц соответственно, рисунки 4.26 и 4.27).

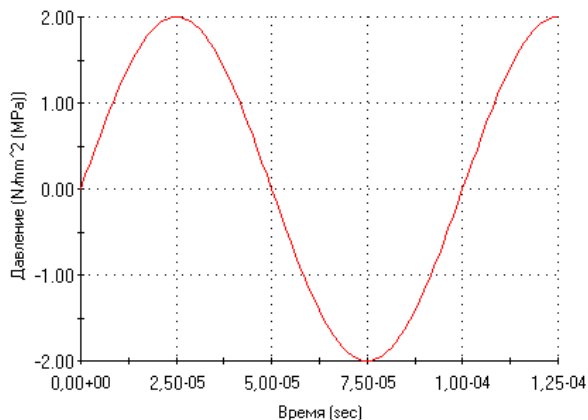


Рисунок 4.26 – График гармонической нагрузки (частота  $f = 10$  кГц,  $A = 2$  МПа)

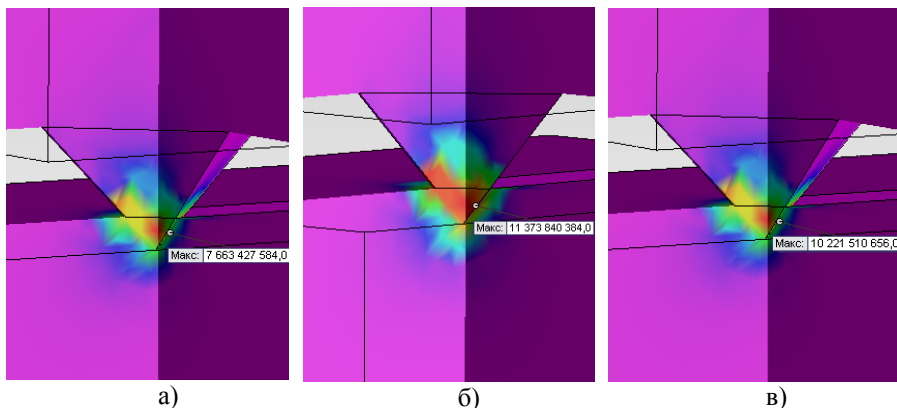


Рисунок 4.27 – Влияние частоты УЗК на величину  $\sigma_{\text{ЭКВ}}$  :  
 а) -  $\sigma_{\text{ЭКВ}} = 7,7$  ГПа ( $f = 0$  кГц); б) -  $\sigma_{\text{ЭКВ}} = 11,4$  ГПа ( $f = 10$  кГц);  
 в) -  $\sigma_{\text{ЭКВ}} = 10,2$  ГПа ( $f = 50$  кГц)

Проведенные расчеты показали, что с повышением частоты УЗК, прикладываемых к модели, НДС в зоне резания существенно меняется. Этот эффект можно использовать на практике. Появляется возможность существенно снизить гамму шлифовальных кругов в плане их характеристик путем изменения частоты УЗК. Т.е., используя круги ограниченного диапазона характеристик, можно достичь таких же результатов, для получения которых ранее требовались шлифовальные круги с довольно большим набором характеристик.

При изучении объемного НДС зоны контакта «зерно - связка» (рис. 4.28) было установлено, что в случае наложение УЗК напряжения равномерно распределяются вдоль всего зерна, что улучшает его удержание в связке.

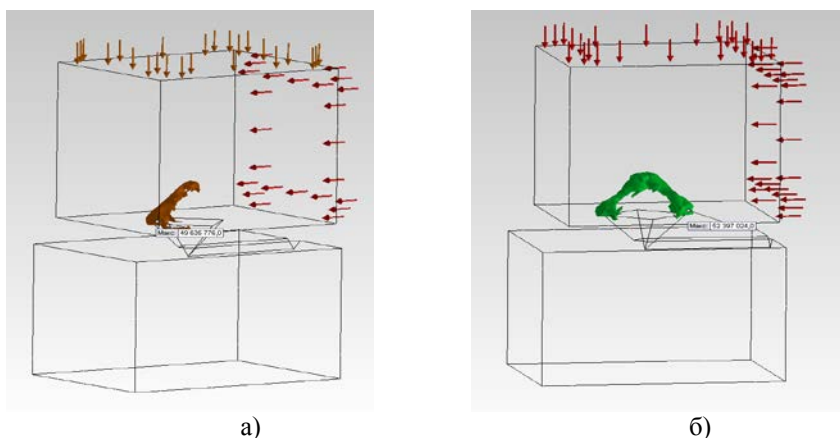


Рисунок 4.28 – Объемное НДС зоны контакта «зерно - связка»

а) -  $f = 0$  кГц; б) -  $f = 50$  кГц

Экспериментально установлено, что применительно к обработке ПСТМ наиболее эффективным представляется способ ультразвукового шлифования, но только не с продольными, как это принято для улучшения качества обработки [8], а с поперечными колебаниями. Они создают дополнительные ударные нагрузки в контакте «зерно–ПСТМ», что с одной стороны интенсифицирует процесс съема припуска, а с другой обеспечивает процесс формирования на зернах режущего микро- и субмикрорельефа.

Такой способ эффективен только в тех случаях, когда дополнительная энергия ультразвука, вводимая в зону шлифования, не будет приводить к образованию дефектного слоя в процессе ультразвукового шлифования. Этот способ не применим при шлифовании ПСТМ с чрезмерно напряженной исходной структурой после синтеза и большим содержанием внутренних дефектов. Для таких материалов целесообразно применение способа

автономного (вне зоны шлифования, см. рис. 4.12 б) формирования на зернах режущего субмикрорельефа путем воздействия на них алмазными инденторами с ультразвуковой частотой колебаний. Для повышения эффективности процесса шлифования некоторых марок ПСТМ возможно применение комбинации этих двух способов, т.е. введение энергии ультразвука и в зону шлифования и в зону управления.

Схемы практической реализации способов шлифования с интегрированным управлением параметрами РПК представлены на рис. 4.29.

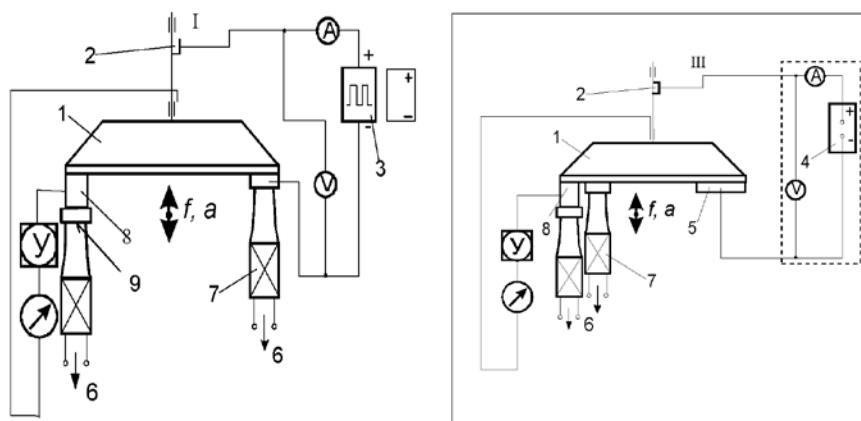
Исследования показали, что в процессе ультразвукового воздействия на круг режущий субмикрорельеф алмазных зерен сохраняется в пределах износа зерна с высотой выступания от  $h_p > 90$  мкм до  $h_p = 35$  мкм. Исследование НДС системы «зерно–ПСТМ» с площадкой износа и со сформированным на зерне субмикрорельефом показали, что при одних и тех же условиях нагружения системы величина приведенных напряжений или энергии деформации увеличивается в десятки раз. Многочисленные модельные эксперименты показали высокую эффективность формирования на зернах субмикрорельефа как фактора повышения производительности процесса шлифования ПСТМ и повышения коэффициента использования алмазных зерен, т.к. алмазное зерно остается активно работающим практически до полного его износа.

#### **4.3.6. Разработка адаптивной системы управления параметрами РПК**

Для адаптивной системы управления параметрами РПК использована способность к электризации трущихся пар «алмаз–алмаз», «алмаз–металл».

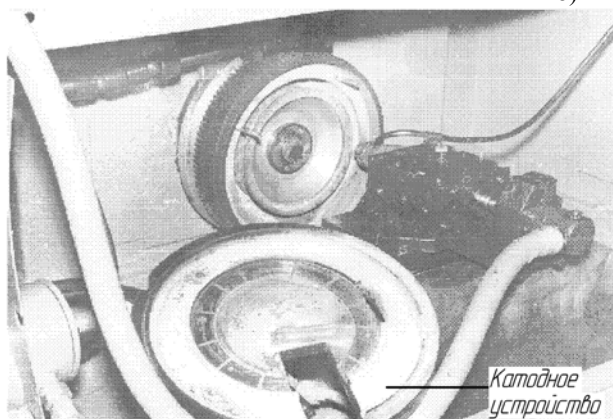
Адаптивная система применена для уменьшения удельного расхода алмазного круга за счет периодического включения и выключения системы ультразвукового воздействия на РПК. Когда на алмазных зернах отсутствуют площадки износа или они не значительной величины, ток электризации в цепи адаптивного управления не велик, и система вибрационного управления выключена. При образовании на алмазных зернах большого количества площадок износа за счет процесса трения алмаза по алмазу в цепи адаптивного управления увеличивается ток электризации. При этом автоматически включается цепь ультразвукового воздействия на РПК. После разрушения площадок износа и уменьшения площади контакта величина тока электризации в цепи падает, и цепь ультразвукового управления РПК отключается, т.е. процесс принудительного микроразрушения зерен прекращается.

Разработанная адаптивная схема управления процессом приспособляемости при алмазном шлифовании ПСТМ существенно упрощает применение этого процесса в автоматизированном производстве (рис. 4.30).



а)

б)



в)

Рисунок 4.29 – Схемы способов ультразвукового алмазного шлифования с управлением приспособляемостью:

*a* – электроэрозионное удаление связки; *б* – электрохимическое удаление связки;

*в* – катодное устройство.

1 – алмазный круг; 2 – токосъемник; 3 – генератор импульсов ШГИ-40-440;

4 – источник постоянного тока; 5 – катодное устройство;

6 – к генератору ультразвуковых колебаний;

7 – устройство для ультразвукового воздействия; 8 – шлифуемый образец;

9 – концентратор

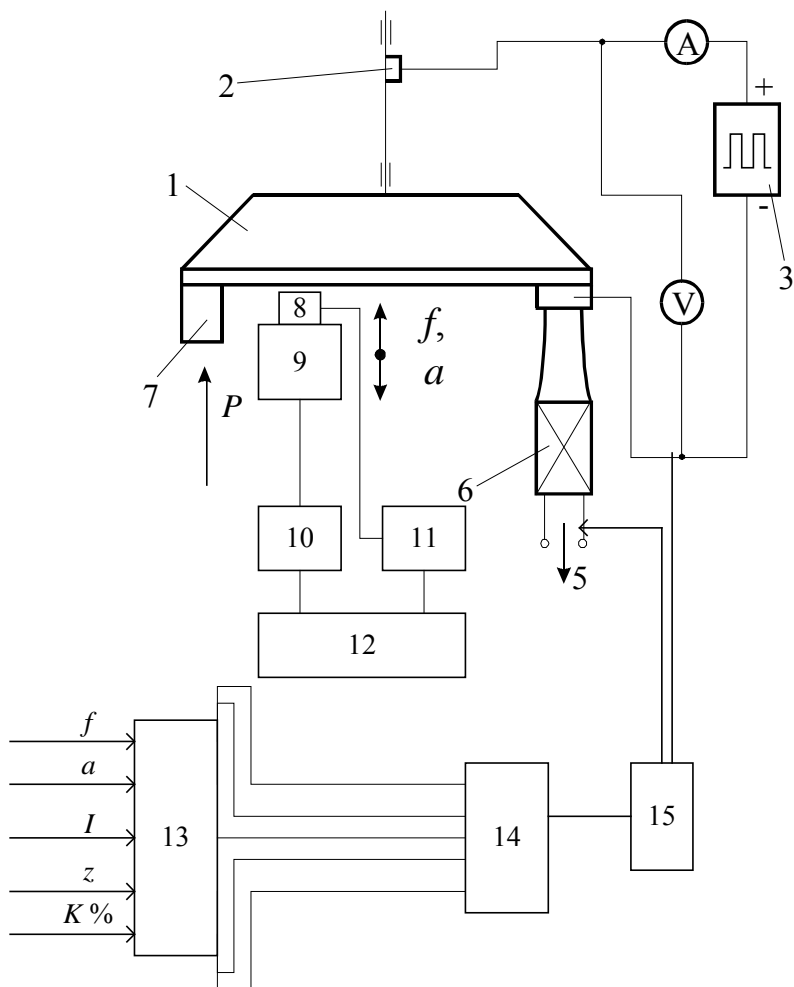


Рисунок 4.30 – Схема адаптивной системы управления параметрами рабочей поверхности круга:

- 1 – алмазный круг; 2 – токосъемник; 3 – генератор импульсов ШГИ-40-440;
- 4 – источник постоянного тока; 5 – к генератору ультразвуковых колебаний;
- 6 – устройство ультразвукового воздействия на РПК;
- 7 – шлифуемый образец; 8 – съемник; 9 – вибропреобразователь;
- 10 – генератор; 11 – усилитель; 12 – синхронный детектор;
- 13 – микроконтроллер; 14 – схема управления;
- 15 – исполнительный механизм

Условия стабильности работы круга:

$$V_{\text{ус}} = V_{\text{изн}} + V_{\text{ур}} + V_{\text{зу}} + V_{\text{зш}}, \quad (4.2)$$

где  $V_{\text{ус}}$  – скорость удаления связки;  $V_{\text{изн}}$  – скорость линейного износа зерен в зоне шлифования;  $V_{\text{ур}}$  – скорость линейного микроразрушения зерен в зоне управления;  $V_{\text{зу}}$  – скорость линейного «заглубления» зерен в связку в зоне управления;  $V_{\text{зш}}$  – скорость «заглубления» зерна в зоне шлифования

Полученные результаты теоретического и экспериментального исследования процесса усталостно - циклического разрушения алмазных зерен подтверждают достоверность исследований, выполненных ранее [18].

Таким образом, высокочастотное вибрационное шлифование является технологией, которая позволила совершить значительный прорыв в области обработки различных материалов. Многочисленными экспериментами установлено, что использование механических и особенно ультразвуковых колебаний приводит к существенному повышению производительности обработки.

Резание с наложением ультразвуковых колебаний радикально изменяет структуру и микрогеометрию обработанной поверхности, при этом качество поверхности заметно улучшается, исключается засаливание поверхности шлифовальных кругов, характерное для традиционного шлифования. Существенно меняется тепловой режим в зоне резания - температура в зоне резания заметно уменьшается. Наконец, устраняется склонность системы «Станок - инструмент - деталь» к возникновению автоколебаний в процессе резания.

В перспективе перед учеными и инженерами стоит задача разработки устройств, которые позволят на практике сравнительно просто и дешево реализовывать рассмотренные идеи на практике.

#### **4.4. Виброабразивная обработка**

*Виброабразивная обработка (ВиАО) вне зависимости от вида и характеристики инструмента представляет собой процесс многокромочного макрорезания, сопровождаемого пластическим деформируемым, реализуя потенциал интегрируемых составляющих в условиях колебаний технологической среды, выполняющей роль режущего инструмента.*

#### **4.4.1. Сущность, основные параметры и технологические возможности виброабразивной обработки**

Процесс ВиАО генерируется последовательным нанесением столкновений под разными углами с обрабатываемой поверхностью большого количества рабочих элементов инструмента (твердых составляющих обрабатывающей среды). Вибрационное воздействие вызвано направленными колебаниями по различным технологическим схемам, из которых в качестве базовой принята схема снятия материала припуска в рабочей камере с вибрирующей абразивной средой.

Наличие в камере вибрирующей обрабатывающей абразивной среды является главным составляющим элементом системы виброабразивного микрорезания, определяющим потенциал данного способа обработки.

Обрабатываемые детали загружаются в рабочую камеру, заполненную средой требуемой характеристики (являющейся в этом случае инструментом). Рабочая камера установлена на пружинных опорах и может колебаться в различных направлениях. Колебания рабочей камере сообщаются от инерционного (или другого вида) вибратора с частотой до 50...100 Гц и амплитудой от 0.5 до 5.0 мм и более.

В соответствии с существующей классификацией ВиАО относится к методам механической обработки, а при введении в состав рабочей среды поверхностно-активных веществ (ПАВ) и химических растворов - к интегрированным методам, в частности, к группе механохимических методов обработки. ВиАО относится к динамическим, а по технологическому назначению - к безразмерным методам обработки; по виду применяемого инструмента - к группе методов обработки свободным абразивом.

В общем случае ВиАО характеризуется следующими явлениями:

- динамическим воздействием обрабатывающей среды в виде множества соударений и скольжения её частиц с поверхностью обрабатываемой детали (сопровождается микрорезанием и деформацией);
- механическим взаимодействием среды и материала заготовки;
- акустическим воздействием ударных волн.

Первые два явления вызывают изменения главным образом на поверхности и в тонком поверхностном слое. Процесс соударения и скольжения частиц среды, которые можно представить как геометрические элементы (микроклиньев) сопровождается микрорезанием, царапанием, упругопластической деформацией в поверхностном слое, тепловыми, адгезионными и диффузионными явлениями в виде схватывания и переноса частиц материала заготовки и среды, их взаимного проникновения в зависимости от состава среды и характеристики материала детали и их химического взаимодействия. В отличие от них вибрационное (акустическое) воздействие охватывает все сечения или весь объем обрабатываемой детали и характеризуется воздействием ударных волн на структурные составляющие

материала, изменяя при этом уровень остаточных напряжений, а также энергетическое состояние. Вибрация, микрорезание и деформирование активизируют химические и физические процессы, происходящие на поверхности раздела среды и заготовки. Перечисленные явления нельзя рассматривать изолированно, так как они действуют в тесной взаимосвязи, дополняя друг друга, усиливая или ослабляя тот или иной эффект.

Таким образом, процесс ВиАО представляет собой сложный комплекс механико-физико-химических явлений, оказывающих существенное влияние на состояние прежде всего поверхности и поверхностного слоя обрабатываемой детали, а при определенных условиях - и всего объема. Характер механических и физико-химических явлений при ВиАО определяется:

- 1) физическими свойствами обрабатываемой среды;
- 2) характеристикой материала обрабатываемой заготовки;
- 3) динамическими параметрами процесса, отражающими режим обработки;
- 4) составом, свойствами и количеством технологической жидкости в рабочей камере;
- 5) некоторыми другими условиями ведения процесса (соотношение обрабатываемой среды (ОС) и обрабатываемых заготовок, степень загрузки рабочей камеры и заполнения её объема технологической жидкостью и др.).

ВиАО представляет собой комплекс взаимосвязанных явлений, в которых участвуют упругопластическая деформация, микрорезание, активация поверхностного слоя металла, образование и разрушение вторичных структур, повторяющихся с частотой действия возмущающей силы.

В процессе обработки по базовой схеме заготовки и рабочая среда непрерывно подвергаются переменным по знаку ускорениям, приходят в интенсивное относительное перемещение, совершая два вида движений - колебания и медленное вращение всей массы (циркуляционное движение). От стенок рабочей камеры вибрация передается к прилегающим слоям рабочей среды, которые передают ее следующим слоям и т.д.

В процессе обработки заготовки занимают различные положения в рабочей среде, что обеспечивает достаточно равномерную обработку всех поверхностей, контактирующих с рабочей средой. Воздействие на обрабатываемую заготовку одновременно большого числа микроударов в различных направлениях способствует удержанию ее во взвешенном состоянии, исключая таким образом грубые забоины и повреждения.

Под действием вибраций обработка происходит относительно равномерно во всех зонах рабочей камеры. Несколько эффективней обработка у дна, где давление рабочей среды выше. По мере удаления от стенок рабочей камеры амплитуда колебаний частиц рабочей среды и

интенсивность обработки уменьшаются. При наложении дополнительного давления на объем рабочей камеры интенсивность обработки в различных ее зонах в значительной мере выравнивается.

Процесс обработки осуществляется преимущественно с периодической или непрерывной подачей в рабочую камеру технологической жидкости требуемого состава и значительно реже всухую. Технологическая жидкость обеспечивает удаление продуктов износа (частиц металла и абразива) с поверхности деталей и частиц рабочей среды, смачивает среду и деталь, помогает их разделению и равномерному распределению деталей в рабочей среде. Изменением уровня жидкости в рабочей камере регулируется интенсивность обработки. В состав технологической жидкости могут вводиться различного рода химические добавки со специальными свойствами, что позволяет также регулировать интенсивность процесса и качество поверхности. Жидкость способствует также охлаждению обрабатываемых заготовок и деталей.

В зависимости от назначения операции в качестве рабочих сред могут применяться абразивные гранулы, металлические и неметаллические деформирующие, режущие и полирующие материалы требуемой характеристики, формы и размеров.

Интенсивность вибрационной обработки зависит от режима и продолжительности обработки, характеристики и размеров частиц рабочей среды, объема рабочей камеры и степени её заполнения, механических свойств материала обрабатываемых заготовок и др. Наиболее общими параметрами процесса являются сила ударов (микроударов) и характеристика обрабатываемой среды. В числе основных параметров ВиАО следует назвать характер движения (траекторию) рабочей камеры, частиц ОС, их скорость и ускорение, силу микроударов, контактное давление, напряжение и температуру, возникающую в зоне действия микроударов, среднюю температуру и давление в рабочей камере.

Численные значения указанных параметров следующие: амплитуда колебаний в большинстве случаев изменяется в пределах 0,5 - 5 мм; частота колебаний достигает 15 - 50 Гц. Скорость частиц рабочей среды может достигать 0,5 - 1 м/с; ускорение 20 - 150 м/с<sup>2</sup>; сила микроударов 1,5 - 3 кгс и более, возникающие при этом контактные давления в зоне микроударов могут достигать 700- 1500 кгс/мм<sup>2</sup>; средняя температура в рабочей камере обычно не превышает 30 - 40° С.

Виброабразивная обработка, используемая для выполнения отделочно-зачистных операций упрочняющего или стабилизирующего эффекта, осуществляется преимущественно в среде абразивных гранул, а также металлических и твердосплавных тел. Получение упомянутого технологического эффекта, возможность управления процессом предопределяются состоянием обрабатываемой среды и характерными ее

параметрами. В числе последних рассматриваются: значение эквивалентной массы вибрирующей среды; коэффициент восстановления; параметры силовых связей; динамический зазор между частицами среды; диссипативные и квазиупругие свойства среды.

Рассмотрение физической сущности процесса показывает, что он состоит в комплексном воздействии на обрабатываемые детали и их поверхность ряда факторов, вызванных вибрацией и наличием рабочей среды соответствующей характеристики.

1) Множества микроударов частиц рабочей среды в различных направлениях, обеспечивающих равномерное и всестороннее воздействие на предметы, детали, материалы. В зависимости от характеристики частиц среды и её состава создаются условия для протекания процессов, многократного упругопластического деформирования, микрорезания и истирающе-сглаживающего действия;

2) переменных ускорений, вызывающих протекание ударно-волновых процессов, изгибные напряжения;

3) воздействия химически и поверхностно-активных веществ, вызывающих протекание физико-химических процессов;

4) интенсивного направленного перемешивания рабочей среды, обрабатываемых деталей, транспортируемых материалов.

Анализируя значение каждого из перечисленных параметров процесса, можно следующим образом представить его технологические возможности.

1. Основным элементом многих методов и процессов механической обработки деталей машин, приборов и инструментов является ударное микрорезание. Отсутствие жесткой связи детали и инструмента исключает возможность эффективного и регулируемого влияния на геометрические размеры и форму деталей. Поэтому процесс вибрационной обработки является безразмерным, т.е. не определяющим форму и размеры обрабатываемых деталей.

Однако отсутствие жесткой связи не только ограничивает, но и расширяет возможности вибрационной обработки. Так, отсутствие жесткой связи детали и инструмента (рабочей среды) и равномерная обработка всей поверхности, с которой контактирует рабочая среда, обеспечивают отделочно-зачистную и упрочняющую обработку различных деталей простой и сложной формы, а наличие перемешивания и «текучести» рабочей среды определяет условия для эффективного применения процесса при обработке переходных элементов поверхности детали: галтелей и кромок.

2. Воздействие переменных ускорений при различной ориентации обрабатываемых деталей и непрерывное нанесение микроударов по обрабатываемой поверхности обеспечивают динамический характер протекания процесса, ударно-волновые явления и выполнение таких операций, как снятие, выравнивание или образование оптимальных

остаточных напряжений, их стабилизация на определенном уровне, осуществление упрочняющей и стабилизирующей обработок.

3. Конструктивное исполнение устройств для ВиАО и достаточно продолжительное протекание процесса позволяют размещать и применять различные составы твердых, жидких и смешанных составов рабочих сред, а также изменять их температуру. Создаются условия как для процессов механической обработки в виде микрорезания и пластического деформирования, так и физико-химических процессов (химических реакций, диффузии, адгезии, адсорбции) и их совмещения путем введения в состав рабочей среды соответствующих порошкообразных материалов, растворов, суспензий, электролитов. При этом, как известно, воздействие вибраций на обрабатываемые поверхности и растворы, электролиты или суспензии существенно интенсифицирует физико-химические процессы.

Отмеченные предпосылки ВиОУ указывают на широкие технологические возможности. Однако конкретные условия ее применения на различных операциях, раскрытие физической сущности протекания процесса в каждом случае и практическая целесообразность требуют дополнительных исследований и апробации. Следует отметить, что для виброабразивной обработки с большим числом переменных факторов характерной является необходимость экспериментальной проверки конкретных условий ее применения для различных операций, а в ряде случаев и для различных типов деталей, а также возможность получения одинакового результата (с точки зрения технических требований) различными путями (при различном сочетании режимов обработки, характеристики и размеров рабочей среды, объема рабочих камер, продолжительности обработки). В этом случае оптимальный вариант выбирается, исходя из соображений экономического характера.

#### **4.4.2. Технологическое оснащение, оборудование, приспособления, инструментальная среда, технологическая жидкость**

Технологическое оснащение процессов вибрационной обработки включает оборудование (вибрационные станки, установки, машины), инструменты (рабочие среды), дополнительные устройства (средства загрузки и разгрузки рабочей среды, отделение деталей от рабочей среды), приспособления (закрепление и ориентация обрабатываемых деталей). В отечественной и зарубежной практике разработан достаточно обширный типаж технологического оснащения. С учетом большого многообразия обрабатываемых деталей, их размеров и формы изготавливаются вибрационные станки с объемом рабочей камеры от 1 - 5 до 250 - 28000 дм<sup>3</sup>. Существуют две принципиально отличные конструктивные схемы вибрационных станков: с прямоугольной формой рабочей камеры и кольцевой (торовой) или спиральной. На рис. 4.31 (а, б) представлен общий вид и кинематическая схема вибрационного станка общего назначения с прямоугольной и торовой формой рабочей камеры.

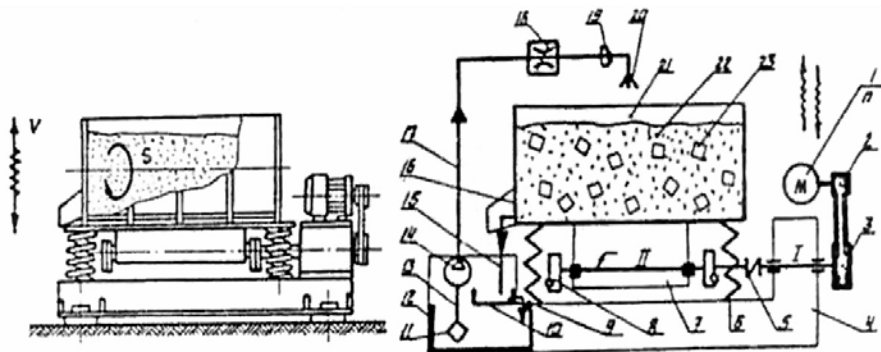


Рисунок 4.31 – Вибрационный станок общего назначения: а - виды движений:

V - главное движение; S - движение подачи; б - кинематическая схема:

I - вал промежуточный; II - вал вибратора; 1 - электродвигатель; 2 - шкив ведущий; 3 - шкив ведомый; 4 - станина; 5 - муфта эластичная; 6 - пружина; 7 - вибратор; 8 - груз дебалансный; 9 - 20 - система подачи ТЖ; 21 - рабочая камера (контейнер); 22 - рабочая среда; 23 - обрабатываемые заготовки

Встречаются опытные образцы вибрационных станков, у которых форма рабочей камеры отличается от названных выше традиционных форм (щелевая, трубчатая и т.п.). Разработкой и производством оборудования для ВиО занимается ряд организаций в нашей стране и за рубежом (Россия, Германия, Франция, Великобритания, США, Италия, КНР, Болгария, Япония и др.

При большом многообразии конструкций технологического оснащения есть и принципиально общие элементы, характерные для любого типа вибрационного устройства: управляемый источник колебаний и его вид, рабочее пространство, в пределах которого реализуется вибрационное воздействие, схема приложения вибраций и др.

В общем случае вибрационная машина (вибрационный станок) состоит из приводного двигателя, вибровозбудителя и рабочего органа. При этом двигатель взаимодействует с источником энергии, а рабочий орган - с обрабатываемой и обрабатывающей средой. Таким образом, при анализе работы вибромашины приходится иметь дело со сложной электромеханической системой.

Из условий виброзащиты подвеска вибрационной машины выполняется из мягких упругих элементов, что обуславливает работу машины в резонансном режиме.

Двигатель передает вращающий момент на дебалансный вал вибровозбудителя, являющегося источником колебаний, а от него на рабочий орган. Вибрирующий рабочий орган передает колебания обрабатываемой среде. В

свою очередь, инерционные, упругие и диссипативные свойства обрабатываемой среды влияют на движение рабочего органа, который будучи связанным с вибровозбудителем, оказывает воздействие на вращение дебалансного вала, а тот на двигатель. Двигатель не только потребляет электрическую энергию из ее источника, но и оказывает влияние на источник энергии, формируя в зависимости от нагрузки величину коэффициента мощности.

Связи между элементами вибромашины определяются многими факторами, зависящими от конструктивных особенностей и назначения последней.

Они могут быть более или менее жесткими, но практически всегда являются нестационарными.

Наличие общих признаков создает предпосылки для классификации различных видов технологического оснащения. Тем не менее, создать общий типаж оборудования без разделения его с учетом отраслевой специфики не представляется возможным. В этой связи последующее представление конструкций технологического оснащения предусматривается осуществлять с учетом принципиальных отличий отраслевых технологий металлообработки. Немаловажное значение для создаваемых конструкций вибрационных станков имеет вид выполняемой технологической операции: поверхностная обработка деталей машин, приборов, инструментов; измельчение материалов; транспортирование; смешивание; сепарация (разделение). Излагаемый ниже материал отражает конструктивные особенности вибрационных станков, разработанных и эксплуатируемых в металлообрабатывающей промышленности (рис. 4.32).

Применение и назначение. Применение различных конструкций вибрационных машин, станков, установок, приборов и инструментов, их служебное назначение рассматривается в связи с их отраслевой ориентацией. Учитывая большое разнообразие конструктивных решений технологического оснащения этот признак (отраслевая направленность) является наиболее приемлемым, хотя и не единственным.

В технологии металлообработки используется большое многообразие вибрационных станков, инструментов и устройств. С их помощью осуществляются процессы очистки заготовок и деталей от окалины, коррозии, загрязнений, формовочных смесей; удаления заусенцев, скругления кромок, шлифования и полирования, упрочняющей и стабилизирующей обработки; формования литейных форм; вибропрессование в заготовительно-штамповочном производстве; интенсификация и автоматизация процессов сборки и разборки изделий; ориентация и поштучная выдача в зону обработки заготовок и деталей и их счет; межоперационное транспортирование деталей и материалов; смешивание технологических жидкостей и смесей; вибрационная обработка абразивным металлическим лезвийным и деформирующим, инструментами и др.

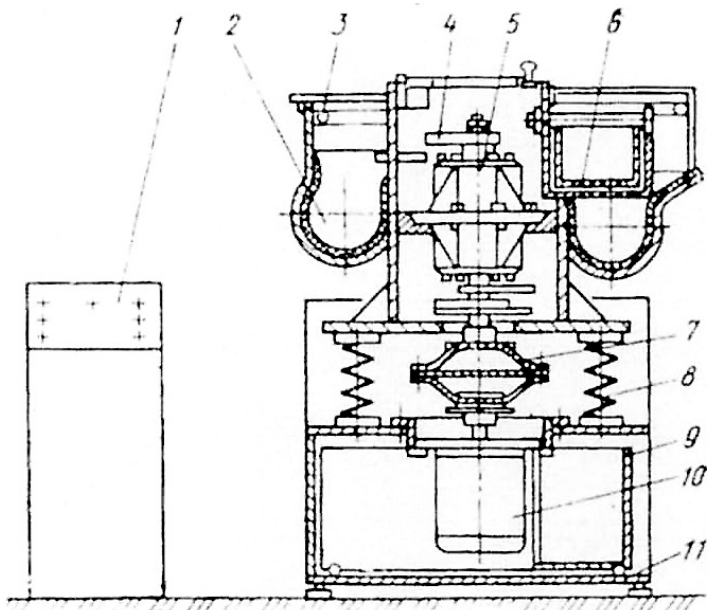


Рисунок 4.32 – Схема вибрационного станка модели УВСО-6:

1 - пульт управления; 2 - контейнер; 3 - трубка подачи СОТС; 4 - дебалансные грузы; 5 - вибратор; 6 - сепаратор; 7 - эластичная муфта; 8 - спиральная пружина; 9 – бак отстойник; 10 - электродвигатель; 11 - станина

Основную часть при этом составляют вибрационные станки, технологические машины и инструменты, работающие в пределах низкочастотного (10-50 Гц) спектра колебаний. Меньшую часть составляют ультразвуковые станки и установки.

Режим работы: дорезонансный, характеризующийся тем, что частота вынужденных колебаний  $f_{\text{вк}}$ , возбуждаемая приводом, ниже частоты собственных колебаний системы  $f_{\text{ск}}$ ; резонансный режим, при котором  $f_{\text{вк}} \sim f_{\text{ск}}$ ; зарезонансный режим, для которого  $f_{\text{вк}} > f_{\text{ск}}$ .

По принципу действия различают устройства периодического и непрерывного действия.

Специфика конструктивного исполнения определяется формой и размерами рабочей камеры, а также их количеством; характеристикой упругих связей; траекторией колебаний и направлением вибрационного воздействия (горизонтальное, вертикальное, наклонное, комбинированное).

Принципиальная схема и основные элементы конструкций вибрационного оборудования и инструментов. Для осуществления

технологических процессов принципиальная схема вибрационных устройств (станки, машины, аппараты, инструменты) должна располагать такими основными элементами, как источник колебаний (вибратор); рабочий орган, обеспечивающий вибрационное воздействие на объект обработки, транспортирование, перемещение, разрушение и т.п.; силовые конструктивные элементы, обеспечивающие размещение и взаимодействие рабочих органов (корпус, каркас и т.п.); основание с амортизаторами, на котором установлены все конструктивные элементы - основные и вспомогательные.

В сфере металлообрабатывающего оборудования рассмотрим две схемы вибрационных станков: с прямоугольной формой рабочей камеры и горизонтальным расположением оси вибратора и с кольцевой (торовой) формой рабочей камеры и вертикальным расположением оси вибратора. Принципиальная схема конструкций вибрационного станка с прямоугольной формой рабочей камеры представлена на рис. 4.33.

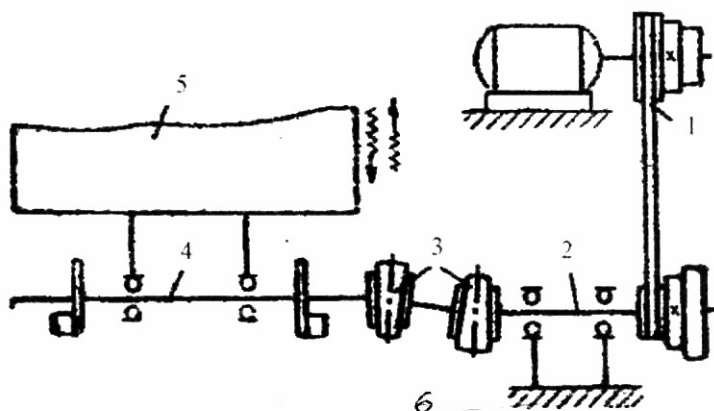


Рисунок 4.33 – Схема конструкции вибрационного станка с прямоугольной формой рабочей камеры и горизонтальным расположением оси вибратора: 1-электродвигатель (привод) и ступенчатый шкив; 2 - вал промежуточной опоры; 3 - гибкая муфта; 4-вибратор; 5 - рабочая камера; 6-основание

Привод вибратора 1 (он может быть встроенным) через вал 2 промежуточной опоры и гибкие эластичные муфты 3 передает вращение вибратору 4, прикрепленному к днищу рабочей камеры 5.

Аналогичные элементы включает и принципиальная схема вибрационного станка с кольцевой (торовой) рабочей камерой СВТ-20. В

отличие от схемы, представленной на рис. 4.33, расположение оси вала вибратора в данном случае вертикальное.

В таблице 4.1 приведены основные части станка СВТ-20

Таблица 4.1 – Основные части станка СВТ-20

№ п/п	Наименование	Количество	Прим.
1	Камера рабочая	1	
2	Вибратор	1	
3	Муфта	1	
4	Привод (электродвигатель)	1	
5	Станина	1	
6	Виброизоляторы	4	
7	Тумба	1	
8	Камера рециркуляционная (бакотстойник)	1	
9	Пульт управления	1	
10	Рукав подачи (Ø 12 мм) и слива (Ø 20 мм) технологической жидкости	1+1	

На рис. 4.34 представлен станок СВТ-20 с торовой формой рабочей камеры, предназначен для виброабразивной обработки: шлифования и полирования, удаления заусенцев, притупления острых кромок, снятия следов облоя групповым методом большого количества деталей различной конфигурации с размерами до 150 мм из черных и цветных металлов.

Станок состоит из камеры 1, установленной на пружинах, опирающихся на станину 5, вибратора 2, закрепленного внутри рабочей камеры и привода 4, соединенных муфтой 3 и размещаемых внутри станины, камеры рециркуляционной 8 и пульта управления 9, размещаемого на тумбе. Вибратор 2, закрепленный на камере 1, сообщает ей трех координатные колебания. Колебания от рабочей камеры передаются массе загрузки, состоящей из частиц рабочей абразивной среды и обрабатываемых деталей. Относительное перемещение частиц среды и деталей обеспечивает при заданном режиме работы обработку последних. Рабочая камера тороидальной формы установлена на девяти спиральных пружинах. Внутренняя поверхность камеры покрыта полиуретаном. Рабочая камера осуществляет колебания в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Обрабатываемые детали подвергаются воздействию абразивной среды и движутся по винтовой траектории в нижней части камеры обработки. В верхней части боковой стенки камеры закреплена трубка с отверстиями для подачи технологической жидкости.

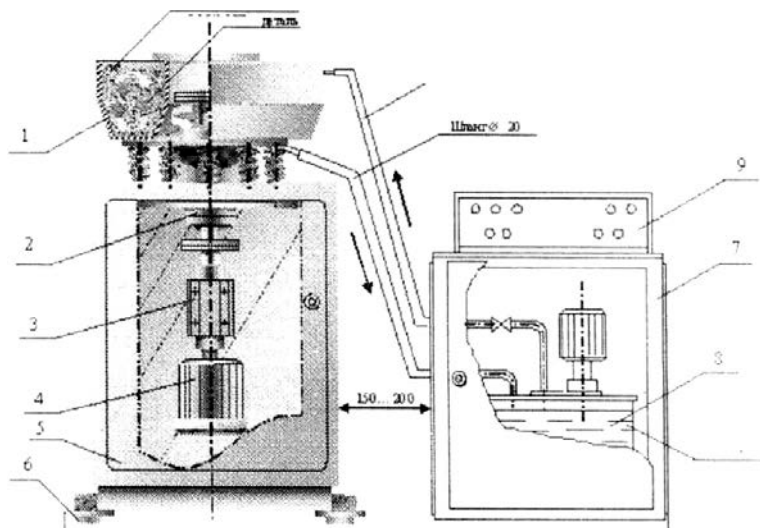


Рисунок 4.34 – Вибрационный станок с торовой формой рабочей камеры

ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА:

1. Объем рабочей камеры,  $\text{дм}^3$ : 20;
2. Форма рабочей камеры : торовая;
3. Система вибровозбудителя: дебалансная;
4. Частота колебаний, Гц: 22(1420 кол/мин);
5. Амплитуда колебаний регулируемая, мм:  
- по вертикали от 1 до 4;  
- по горизонтали от 0 до 2;
6. Максимальная масса загрузки, кг: 35;
7. Максимальный размер обрабатываемых деталей, мм: 150;
8. Питание станка: трехфазная сеть переменного тока 3(380) В, 50Гц;
9. Установленная мощность электродвигателя, кВт: 1,1;
10. Производительность насоса для подачи технологической жидкости, л/мин: 20;
11. Габаритные размеры станка, мм: длина-670; ширина-625; высота-1210;
- Габаритные размеры тумбы, мм: длина-560; ширина-600; высота-750;
12. Масса станка, кг: 367;
13. Уровень шума: не превышает 85 дБл;
14. Средний срок службы станка: не менее 5 лет, при средней интенсивности эксплуатации 12 часов в сутки.

Вибратор 2 представляет собой вал, прикрепленный вертикально к фланцу внутренней обечайки рабочей камеры, является источником возмущающей силы и колебаний рабочей камеры. Вибратор состоит из сварного корпуса, вала, на концах которого закреплены две пары несбалансированных грузов-дебалансов, вращающегося в опорах качения. Каждый дебаланс состоит из двух секторов, которые устанавливаются друг относительно друга на любой угол. Регулирование амплитуды и параметра направленного движения массы, находящейся в рабочей камере, достигается изменением взаимного расположения секторов верхнего и нижнего дебалансов. При вращении вала вибратора создается центробежная сила, которая вызывает колебания рабочего контейнера. Станина 5 выполнена сварной прямоугольной формы коробчатого типа. На станине установлены цилиндрические пружины, на которые опирается рабочая камера с закрепленным внутри нее вибратором. Внутри станины размещены привод 4 с муфтой 3. Привод 4 предназначен для создания крутящего момента и передачи его от вала электродвигателя, двухступенчатого двухручьевого шкива для клиноременной передачи, тумбы, на которой установлен электродвигатель. Муфта предназначена для передачи крутящего момента от вала электродвигателя к валу вибратора в условиях значительных осевых и радиальных смещений. В качестве упругих элементов применяется материал из резиновой ленты. Камера рециркуляционная предназначена для многократного использования находящейся в замкнутом цикле технологической жидкости. Она представляет собой сварной резервуар с лабиринтными перегородками, в котором установлены баки грубой очистки и электронасос, который подает технологическую жидкость в камеру. Регулировка расхода жидкости осуществляется вентилем. Отработанная жидкость стекает в баки грубой и тонкой очистки, где происходит окончательное отстаивание раствора. Затем цикл повторяется. Конструкция баков грубой очистки позволяет легко снять их для удаления скопившихся продуктов отстоя. Пульт управления выполнен отдельным блоком.

Дополнительное технологическое оснащение. Для эффективного осуществления технологических процессов ВиОЗО помимо основного оборудования (вибрационных машин, станков, установок) широко используется дополнительное оснащение. В зависимости от содержания технологического процесса вид и назначение дополнительного оснащения достаточно многообразны: устройства для загрузки и разгрузки деталей, устройства для закрепления и ориентации последних в процессе обработки, устройства для разделения деталей и рабочей среды, в том числе и рабочих сред различной фракции (сепарирующие устройства), устройства для сушки обработанных деталей и сред, транспортно-ориентирующие устройства.

Использование дополнительного оснащения позволяет расширить технологические возможности вибрационных процессов, повысить их

производительность и облегчить условия труда. В ряде случаев применение приспособлений позволяет вести обработку таких деталей, которые в других условиях обработать на вибрационном станке невозможно. Среди них: универсальные предназначены для установки и закрепления деталей, принадлежащих одной технологической группе; специализированные - для группы близких по конфигурации деталей, имеющих сходные базовые поверхности (шкивы, диски, шестерни, пальцы и т.д.); специальные - для конкретной детали при выполнении определенной технологической операции (коленвал, корпус двигателя и т.д.).

По конструктивным признакам приспособления подразделяются на кассетные, барабанного типа, типа «рама» или «ферма», «плавающая корзина», типа «вал». Приспособление должно быть простым по конструкции, надежным в работе, универсальным.

Конструктивное исполнение дополнительного оснащения вибрационных процессов определяется типом производства, программой выпуска, размерами и массой обрабатываемых деталей, технологическими требованиями, предъявленными к ним.

При обработке сравнительно небольшого количества деталей крупных размеров в условиях индивидуального и мелкосерийного производства загрузка и разгрузка их не представляет особых затруднений и часто осуществляется вручную или с помощью универсальных средств малой механизации, без применения специальных разделительных устройств. В большинстве случаев вибрационная обработка применяется для одновременной обработки большого количества деталей небольших размеров и массы. В этом случае разделение деталей и рабочей среды перечисленными средствами недопустимо. Механизация и автоматизация загрузки и разгрузки рабочих камер может быть осуществлена с помощью различных устройств.

На рис. 4.35 показано устройство для механизации загрузки и разгрузки вибрационного станка УВГ-100 с объемом рабочей камеры 0,1 м<sup>3</sup>. Оно состоит из электропривода, грузовых цепей и системы управления. Тележка сварная, по бокам смонтированы специальные быстродействующие замки, которыми тележка крепится к грузовым цепям подъемного механизма вибрационного станка

После окончания цикла обработки деталей открывается выгрузной люк рабочей камеры, и рабочая среда вместе с деталями высыпается на сито. Детали после отделения от частиц рабочей среды попадают в тару, а среда просыпается в передвижную тележку. Тележка подкатывается к подъемному механизму, крепится к грузовым цепям и поднимается в верхнее положение, где с помощью упоров опрокидывается, и рабочая среда высыпается в рабочую камеру. С помощью этой тележки можно загружать в рабочую камеру не только наполнитель, но и детали.

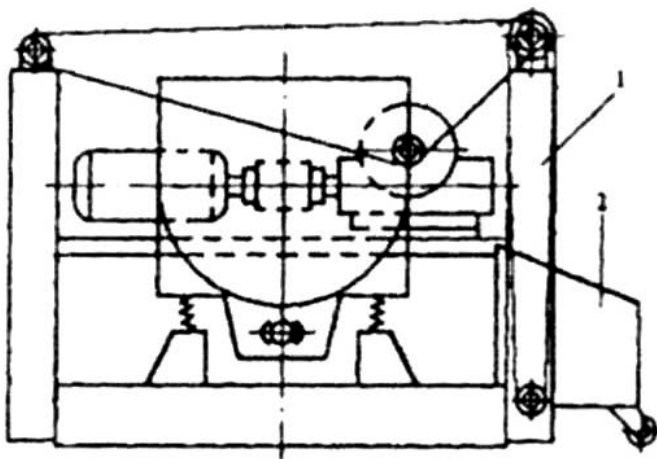


Рисунок 4.35 – Схема устройства для механизации загрузки и разгрузки вибрационного станка УВГ-100: 1 - привод; 2 - сборник деталей

При загрузке обрабатываемых деталей или инструментальной среды в рабочую камеру используют и передвижное механизированное устройство, показанное на рис. 4.36.

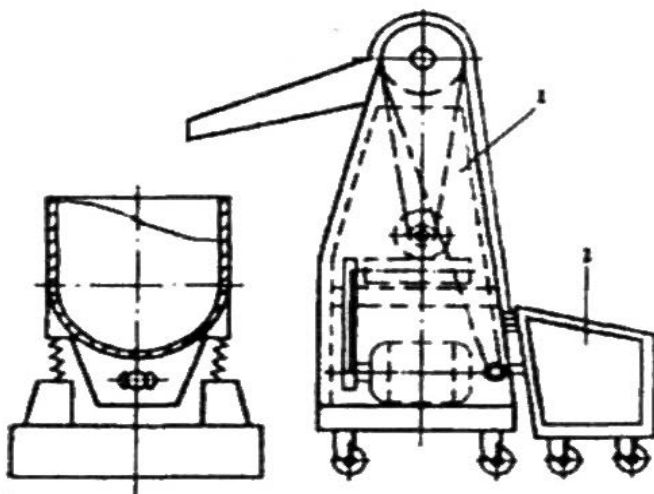


Рисунок 4.36 – Передвижное механизированное устройство для загрузки обрабатываемых деталей или среды

Устройство состоит из загрузчика 1 и тележки 2. Загрузчик представляет собой металлическую конструкцию, установленную на колесах, на которой размещается подъемный механизм. Подъемный механизм состоит из грузовых цепей и электромеханического привода (электродвигатель, редуктор и приводные цепи). Большое распространение получили вибрационные сита, имеющие собственный привод колебаний. Они автономны и могут быть использованы для обслуживания нескольких вибрационных станков. Недостатком таких устройств является необходимость предварительной выгрузки деталей совместно с рабочей средой и последующего возврата среды в рабочую камеру.

Такое устройство состоит из тележки на колесах, четырех опорных пружин, корпуса, электродвигателя, дебалансного вала (или мотора-вибратора) и набора сит. В корпусе устанавливается набор из двух сит.

Средством автоматизации вибрационных станков является соединение вибросита со скиповым подъемником в одном вспомогательном устройстве. При этом после окончания процесса сепарации ковш с рабочей средой автоматически поднимается и опрокидывается в рабочую камеру станка с последующим возвратом в исходное положение (рис. 4.37).

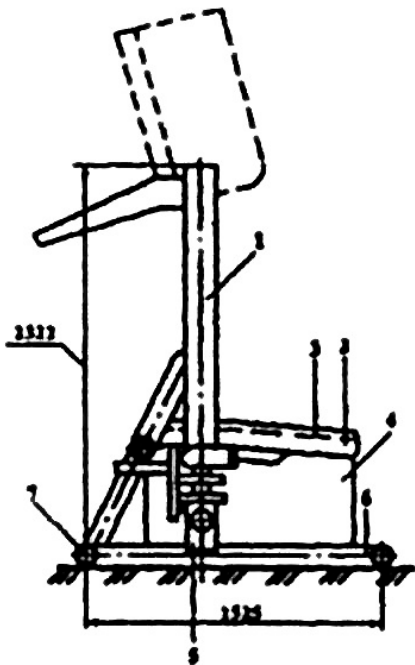


Рисунок 4.37 – Схема соединения вибросита со скиповым подъемником

Имеются разработки приспособлений для автоматизации процесса сепарации вибрационных станков с тороидной формой рабочей камеры.

При обработке деталей из ферромагнитных материалов независимо от соотношения размеров частиц рабочей среды и обрабатываемых деталей успешно применяются устройства для магнитной сепарации.

На рис. 4.38 представлен стационарный магнитный сепаратор, смонтированный на станине, который можно переставлять от станка к станку по мере необходимости отделения деталей от частиц рабочей среды.

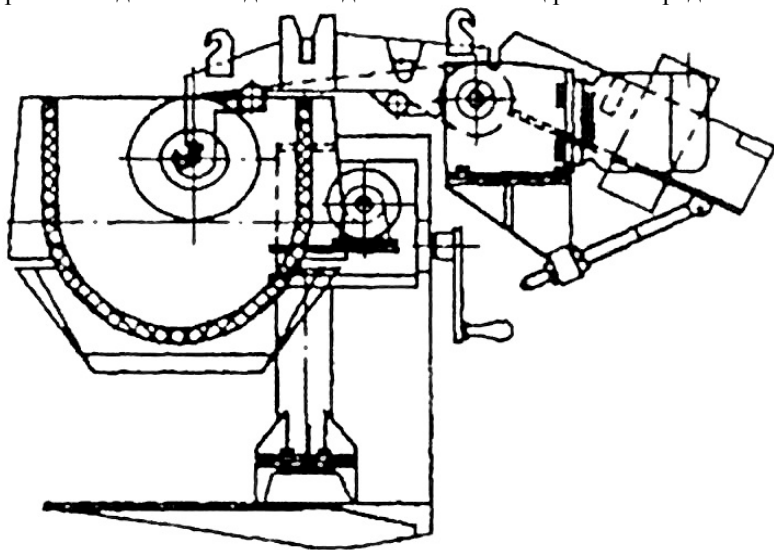


Рисунок 4.38 – Схема стационарного магнитного сепаратора

Плоские магниты в виде шайб или плит могут также использоваться для извлечения стальных деталей из рабочей камеры без выгрузки массы загрузки. На рис. 4.39 показано стационарное устройство, представляющее собой подъемник для разделения и разгрузки деталей из вибрационного станка с помощью электромагнита. Подъемник состоит из электропривода 1, колонны 2, подвески с электромагнитной плитой 3, стрелы 4. В состав привода входят электродвигатель, электромагнитный тормоз и клиноременная передача. Плоская электромагнитная плита за один рабочий прием может отделить и выгрузить партию деталей массой до 10-15 кг из рабочей камеры объемом до 0,2 м<sup>3</sup>. Продолжительность разгрузки составляет 5-7 минут.

Представляет интерес и электромагнитное устройство для отделения мелких плоских деталей от частиц абразива (рис. 4.40).

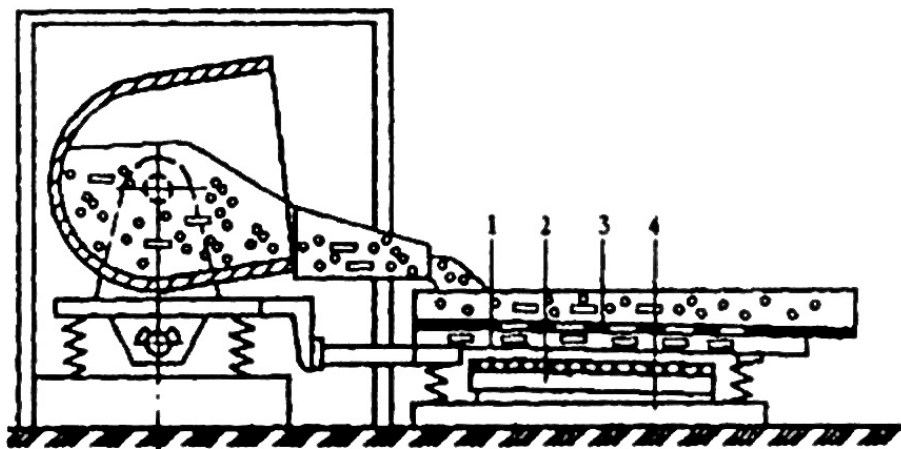


Рисунок 4.39 – Схема подъемника для разделения и разгрузки деталей из вибрационного станка с помощью электромагнита

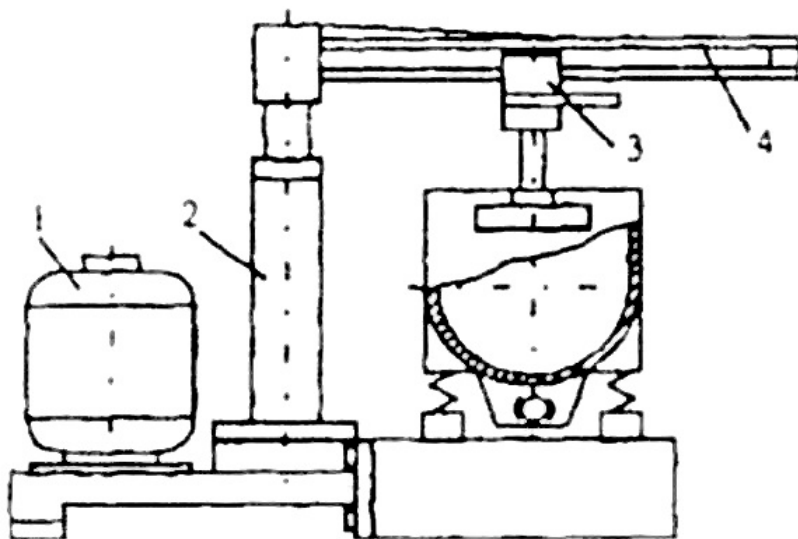


Рисунок 4.40 – Схема электромагнитного устройства для отделения мелких плоских деталей

Оно состоит из сменного решета 3 с щелевыми пазами, жестко соединенного штоком с виброплощадкой станка ВМ-2х50, электромагнита 1 и лотка 2, закрепленных на основании 4. После окончания ВиОЗО деталей рабочая камера поворачивается на стойках на угол 90°, и абразивный наполнитель вместе с мелкими деталями по разгрузочному лотку выгружается на вибрирующее сменное решето. Под действием магнита и собственного веса детали прижимаются к ситку, проваливаются через щелевые пазы и собираются на лотке, с которого периодически удаляются по наклонному вибрирующему лотку при кратковременном отключении электромагнита.

Известны конструкции вибрационных машин, в которых детали размещаются неподвижно в специальных приспособлениях, а последние имеют возможность вращаться вокруг рабочей камеры в направлении, противоположном движению рабочей среды, что значительно увеличивает производительность процесса. Вращательное движение приспособления обеспечивается за счет его установки с зазором во втулках, размещенных на торцах колеблющейся рабочей камеры.

Вибрационная обработка в большинстве случаев осуществляется с применением технологических жидкостей требуемой характеристики, в связи с этим возникает необходимость их сушки после обработки. Процесс сушки деталей осуществляется тремя способами: испарением, центрифугированием, вращением барабана с опилками.

При сушке испарением детали пропускаются через бак, наполненный горячей водой, затем сушатся на воздухе либо с подогревом. При этом методе детали могут храниться, даже если на поверхности остаются остатки солей, содержащихся в воде.

Сушку центрифугированием применяют для деталей, имеющих отверстия сложной формы, из которых вода может быть удалена только при условии размещения деталей соответствующим образом. Центробежные сушилки могут быть встроены в поточные линии.

Процесс сушки методом вращения барабана с опилками как бы имитирует протирание деталей и позволяет удалять с их поверхности различные осадки солей, содержащихся в моечных растворах или ТЖ. Для этой цели используются в основном подогреваемые барабаны.

Существует два типа барабанных сушилок с опилками в зависимости от режима работы: непрерывного действия и периодического.

Наиболее широкое применение получили чашеобразные и барабанные сушилки, работающие на физико-химических эффектах.

В ротационных сушилках с чашеобразным и барабанным контейнерами сушку осуществляют в опилках твердых пород дерева. При сушке большого количества деталей применяют агрегативные сушилки барабанного типа, в которых сушка, сепарирование и выгрузка осуществляются автоматически.

Сушка в обезвоживающих средствах осуществляется в специальных контейнерах, предотвращающих соединение высушенных деталей с вытесненной водой.

Для сушки деталей после вибрационной обработки и промывки могут применяться также стандартные сушильные устройства типа СШ-1, СШ-2, обеспечивающие температуру в камере до 200 °С.

#### **4.4.3. Инструментальная среда (ОС)**

Важным условием осуществления процесса ВиАО является обрабатывающая среда, играющая роль инструмента. В отечественной и зарубежной практике в качестве рабочих сред применяют искусственные и естественные абразивные и неабразивные материалы. Рабочая среда оказывает решающее влияние на достижение качества поверхности и производительность процесса. Выбор рабочей среды производится в зависимости от назначения выполняемой операции, материала и особенностей конфигурации детали, применяемого способа ведения процесса.

При выборе рабочих сред необходимо учитывать требования к качеству обрабатываемой поверхности, обеспечение наивысшей производительности и минимальной себестоимости процесса, ограничение номенклатуры сред с целью удобства приобретения, подготовки к использованию, сортировки и хранения.

В состав рабочей среды входят твердый и жидкий наполнители. Твердый наполнитель - рабочая среда - выполняет роль режущего и деформирующего элемента, а также разделяет детали, предотвращает их соударение и слипание.

Жидкий наполнитель оказывает существенное влияние на протекание процесса, обеспечивает удаление продуктов износа с поверхности обрабатываемой детали и рабочей среды, смачивает детали и наполнитель, помогает их равномерному распределению в рабочей среде и охлаждению. Наличие жидкого наполнителя позволяет также вводить в состав рабочей среды химические вещества с различными свойствами, способствующими увеличению съема металла и сохранению режущих свойств абразива.

Рабочая (обрабатывающая) среда представляет собой частицы (гранулы) различной формы и размеров, подвергаемые вибрационному воздействию для осуществления процесса обработки.

Классификация рабочих сред осуществляется по форме, размерам, виду материала, способу производства (получения).

Широкий спектр технологических операций и объектов (например, деталей и заготовок) обработки предопределяет, соответственно, и широкую номенклатуру рабочих сред - это абразивные и неабразивные материалы, гранулы произвольной и определенной формы и т.д. Среди общего объема применяемых на практике рабочих сред преобладают абразивные гранулы.

Абразивные среды классифицируются по нескольким признакам: по роду абразивного материала, по форме и зернистости частиц, по твердости, пористости, по виду связующего компонента, по размерам гранул.

К абразивным относятся такие материалы, основные составляющие которых представлены минералами высокой твердости. По роду происхождения абразивные материалы подразделяются на естественные и искусственные. Искусственные абразивные материалы имеют наибольшее применение.

Искусственные абразивные среды отличаются большей стабильностью физико-химических свойств по сравнению с природными; они получили широкое распространение в промышленности, резко ограничив применение природных абразивных материалов, а в ряде случаев вытеснив их полностью.

По форме частицы рабочей среды могут иметь произвольную или правильную геометрическую форму. В промышленности применяются гранулы геометрической формы следующих типов:

- ромбическая призма с прямым основанием;
- звездочка с прямым основанием;
- трехгранная призма с прямым основанием; трехгранная призма с косым основанием ( $45^\circ$ );
- цилиндр с прямым основанием;
- шар абразивный;
- конус.

Среди гранул произвольной формы различают:

- крошку абразивную дробленую;
- крошку абразивную обгалтованную.

Твердость абразивных гранул характеризует прочность связи в них абразивных зерен между собой. По твердости гранулы различают: мягкие (М), среднемягкие (СМ), средние (С), среднетвердые (СТ), твердые (Т), высокотвердые (весьма твердые) (ВТ), чрезвычайно твердые (ЧТ).

По зернистости абразивы подразделяются следующим образом:

- шлифзерно зернистостью от 2000 до 160 мкм;
- шлифпорошки зернистостью от 125 до 40 мкм;
- шлифпорошки зернистостью от 63 до 14 мкм;
- тонкие шлифпорошки зернистостью от 10 до 3 мкм.

По виду связующего компонента абразивные среды подразделяются на среды на основе органических и на основе неорганических связок.

К органическим связкам относятся: бакелитовая, вулканитовая, глифталевая, полимерная.

К неорганическим связкам относится керамическая. Она представляет собой многокомпонентную смесь, составляемую в определенных пропорциях из измельченных сырых материалов. В зависимости от поведения в процессе

термической обработки они делятся на плавящиеся (стекловидные) и спекающиеся (фарфоровидные).

В качестве полимерной связки используют эластичные и жесткие связки, такие как синтетический каучук, поливинилхлорид, новолачная фенолформальдегидная смола, эпоксидная смола, компаунд и др.

Абразивные среды различаются по своей структуре, т.е. по содержанию абразивного материала в единице его объема.

При изготовлении абразивных гранул (или инструментов) применяют следующие абразивные материалы: алмазы, гранаты, корунды, наждак, кремнь, гранит, кварц, флинт, риолит, нефелин, менил, ставролит, полевой шпат, крокус, металлическую крошку, представляющую собой зерна различных твердых сплавов, окись хрома.

Широкое применение получили искусственные абразивные материалы, такие как электрокорунд белый и нормальный, карбид кремния зеленый и черный, эльбор, карбид бора, алмаз синтетический.

Получили также распространение абразивные среды из металлокерамики, фарфора, стеклянные шарики, причем производство таких сред постоянно увеличивается. Это объясняется получением при их использовании более высокого класса шероховатости, низким коэффициентом трения, отсутствием прижогов, способностью к самозатачиваемости, повышающей режущую способность среды и относительно высокой производительностью процесса.

Соотношение объемов шлифовального материала, связки и пор определяет структуру абразивной среды. В зависимости от технологического применения используются различные композиции полимерных связок и абразивного материала. В состав абразивных гранул входят собственно полимерная связка и абразивный наполнитель, позволяющий придавать инструменту необходимые физикохимические и технологические свойства.

Основные технологические характеристики абразивных гранул:

- интенсивность съема металла с обрабатываемой поверхности;
- режущая способность;
- износостойкость;
- шероховатость обрабатываемой поверхности.

Понятие «интенсивность съема материала» не требует дополнительных пояснений. Величина эта измеряется в весовых или объемных единицах за определенный промежуток времени. Режущая способность характеризуется отношением массы снятого материала с единицы поверхности в единицу времени.

Рекомендации по выбору рабочих сред. При выборе состава рабочей среды необходимо учитывать характер выполняемой операции. Наиболее распространенной рабочей средой являются:

- абразивные материалы - для виброабразивной обработки;

- абразивные и неабразивные материалы - для отделочной обработки;
- металлические рабочие среды (шары, ролики и т.д.) - для отделочной и упрочняющей обработки.

Так, например, при выполнении сравнительно грубых операций (удаление грубых заусенцев, черновое шлифование и т.п.), т.е. когда требуется наиболее интенсивный сьем металла, применяется крупнозернистый абразив высокой твердости и наиболее крупной грануляции. Наилучший результат достигается при использовании абразивных гранул зернистостью 25-40 и более, твердостью СТ-Т на керамической связке.

#### **4.4.4. Технологические жидкости (ТЖ)**

Технологические жидкости в процессе ВиАО выполняют следующие функции:

- интенсификация процесса путем непосредственного химического воздействия на поверхность обрабатываемой детали; охлаждение деталей в процессе обработки;
- удаление из рабочей камеры продуктов износа рабочих сред и частиц удаленного материала деталей;
- обеспечение стабильности режущих и выглаживающих свойств рабочих сред, предохранение их от загрязнения и засаливания;
- предотвращение слипания плоских деталей;
- обеспечение пассивирующего и ингибирующего воздействия на поверхность обрабатываемых деталей;
- защита поверхности детали от коррозии в процессе обработки и после нее.

Различают три основные группы рабочих жидкостей.

1. Химические активаторы с кислой средой, предназначены для очистки стальных деталей, разрушения и удаления окалины, интенсификации процесса шлифования

2. Химические активаторы со щелочной средой, предназначены для удаления заусенцев, шлифования и полирования в процессе вибрационной обработки.

3. Химические активаторы с нейтральной средой, обладающие очищающей и моющей способностью, предназначены для полирования, мойки и удаления продуктов износа.

Основными составляющими рабочих жидкостей являются кислоты и щелочи. Для расширения и усиления их действия к ним добавляют компоненты:

- моющие и очищающие (сода, мыло, моющие синтетические средства и др.);
- осветляющие (хлористый натрий, хромовый ангидрид);

– ингибирующие и пассивирующие (нитрид натрия, триэтанол-ламин и др.).

ТЖ могут быть одноразового использования (для выполнения одной операции) или длительного использования (для выполнения обработки в течение смены или нескольких смен).

ТЖ одноразового использования представляют собой высококонцентрированные водные растворы химически активных веществ с различными добавками. Как правило, они используются для обработки одной загрузки деталей, после чего их заменяют или корректируют. Процесс протекает при закрытом сливном отверстии - без циркуляции ТЖ. Количество заливаемой жидкости 3-5 % от объема рабочей камеры (при условии ее заполнения рабочей средой и деталями на 0,7-0,8 объема).

Продолжительность процесса обработки не должна превышать 1,5-2 часа. В противном случае степень загрязнения раствора достигнет величины, препятствующей активному воздействию его на процесс обработки.

После окончания обработки выработанный раствор сливается и рабочая камера промывается для следующей операции.

ТЖ длительного использования - это низкоконцентрированные водные растворы химически активных веществ, продолжительное время сохраняющие свои физико-химические свойства и стабильно воздействующие на процесс виброобработки.

Эти растворы могут периодически или непрерывно циркулировать в системе: рабочая камера - бак-отстойник - рабочая камера. ТЖ принудительно поступает по трубопроводу из бака-отстойника в рабочую камеру и через сливное отверстие и трубопровод возвращается в бак-отстойник. Происходит непрерывная циркуляция раствора через рабочую камеру, заполненную рабочей средой и обрабатываемыми деталями. Скорость подачи жидкости - 2-8 л/мин в зависимости от выполняемой операции, емкости рабочей камеры, жесткости обрабатываемых деталей.

Необходимо, чтобы количество раствора, поступающего в единицу времени в рабочую камеру, было постоянным. В противном случае может наблюдаться:

– при малом количестве раствора - снижение эффективности обработки деталей в результате «засаливания» рабочей среды, скопление большого количества продуктов износа в рабочей камере;

– при избытке раствора - гашение вибраций, замедление циркуляции рабочей среды и деталей, снижение интенсивности процесса.

Применение ТЖ длительного использования более выгодно, так как замена раствора производится после работы станка в течение нескольких смен. Длительность использования этих растворов зависит от ряда факторов: количества раствора в баке-отстойнике, его концентрации, назначения вибрационной обработки на данной операции и, следовательно, загрязнения

раствора, степени естественной убыли от пенообразования, разбрызгивания и т.д.

Химические растворы должны быть несложны по составу, безопасны для обслуживающего персонала и экологически безвредны при спуске в промышленные стоки без отстоя и нейтрализации.

Большое влияние на качество обработки и производительность процесса имеет дозировка химического активатора. Как его недостаточное, так и чрезмерное количество оказывает отрицательное действие на процесс обработки.

ТЖ приготавливаются преимущественно непосредственно на предприятиях при необходимости использования вибрационной обработки.

Состав ТЖ, рекомендуемых для вибрационной обработки, приводится в различных литературных источниках, технических рекомендациях, справочных изданиях.

К технологическим жидкостям, содержащим в своей основе кислоты и щелочи, предъявляются требования по допустимой предельной концентрации компонентов, обеспечению санитарных норм труда рабочих и исключению коррозионного воздействия жидкостей на оборудование, трубопроводы подвода ТЖ, окружающую среду. Общие требования к ТЖ могут быть дополнены при рекомендации конкретных составов с учетом их специфики и условий применения.

Для правильного выбора ТЖ необходимо учитывать комплекс факторов как самого процесса обработки, так и параметров обрабатываемых деталей и сред. В работе [1] указаны используемые в промышленности и хорошо зарекомендовавшие себя составы ТЖ для различных операций вибрационной обработки деталей из стали, алюминиевых и медных сплавов, титана и других материалов. Следует отметить, что рекомендуемые растворы в ряде случаев требуют корректировки своего состава в зависимости от химического состава обрабатываемого материала, масштаба выпуска деталей и других факторов.

#### **4.4.5. Разработка технологической операции ВиАО**

В качестве примера можно рассмотреть и технологический процесс виброабразивной обработки корпуса водосмесителя из латуни. Процесс включает следующие операции.

Метод получения заготовки: кокильное литье. Последовательность выполнения черновой операции вибрационной обработки. Оборудование: станок вибрационный, торový ВТУ-100 с объемом рабочей камеры 100дм<sup>3</sup>. Рабочая среда: формованный абразивный материал типа ПТ 30x30 Волжского абразивного завода ТК 2-036-205-73, зернистостью N<sub>3</sub>=16. Технологическая жидкость: мыльный раствор с непрерывной подачей в рабочую камеру. Амплитуда колебаний: 2,5мм. Частота колебаний: 25Гц; мощность привода: 4кВт. Частота вращения привода: 1000 об/мин. Степень заполнения объема рабочей камеры – 0,85.

Несмотря на широкий спектр технологического применения колебаний, существуют общие подходы и рекомендации для разработки технологических операций ВиАО. Широкие технологические возможности процесса в сочетании с имеющейся гаммой станков различных типоразмеров позволяют производить обработку деталей различной формы и размеров из различных металлов и сплавов, пластмасс, некоторых видов стекла, резины и др. При этом размеры деталей могут колебаться от нескольких миллиметров до нескольких метров (встречаются примеры обработки деталей длиной 16 м).

Обрабатывать можно детали любой, в том числе и весьма сложной формы, за исключением деталей, имеющих глубокие узкие пазы и отверстия, подлежащие обработке, а также детали очень малой жесткости при значительных габаритах.

Разработку технологического процесса ВиАО начинают с выбора технологической схемы обработки. Так, для деталей тел вращения, типа колец, шестерен, шкивов и т.п., рекомендуется применять шпиндельную вибрационную обработку, для деталей из труднообрабатываемых сталей (особенно жаропрочных и некоторых видов нержавеющей) большую производительность обеспечивает вибрационная электрохимическая обработка. При нанесении защитных покрытий используется вибротермомеханическая обработка и т.п.

При выборе оборудования для ВиАО следует учитывать программу выпуска деталей, тип производства, размеры деталей, их прочностные характеристики, а также вид обработки. Например, большой размер рабочей камеры вибрационного станка позволяет обрабатывать одновременно большее количество деталей, что при значительных размерах годового задания позволяет обойтись меньшим количеством станков. Однако следует учитывать, что при увеличении размера камеры возрастает износ абразивных сред, а также увеличивается время вспомогательных операций (сепарация, разгрузка и т.д.). Размер детали влияет на выбор размера рабочей камеры, при этом должны обеспечиваться следующие условия: свободная циркуляция рабочей среды и деталей, отсутствие заклинивания деталей по наименьшему габариту рабочей камеры. Детали малой жесткости рекомендуется обрабатывать в небольших рабочих камерах, чтобы исключить их деформацию. На практике известны случаи, когда при переводе обработки алюминиевых корпусных деталей с вибрационного станка ВС100 (100 дм<sup>3</sup>) на станок ВС850 (850 дм<sup>3</sup>) отмечалась деформация деталей.

Выбор режимов вибрационной обработки в значительной мере определяется видом операции, размерами и жесткостью деталей, материалом обрабатываемых деталей и зернистостью абразивных гранул.

Для черновых операций при удалении дефектного слоя, снятия заусенцев и облог рекомендуется использовать более высокие амплитуды колебаний (3-4 мм) при средних значениях частоты колебаний 20 - 25 Гц. При

операциях чистового шлифования и полирования, а также при обработке деталей малой жесткости рекомендуется использовать малые и средние значения амплитуды колебаний (0,5 - 2,5 мм) в сочетании с повышенной частотой колебаний 30 - 35 Гц. При применении крупнозернистых рабочих сред (зернистостью 40 - 63 и более) амплитуду колебаний следует несколько уменьшать.

Для осуществления обработки деталей, имеющих труднодоступные зоны (различные полости, пазы, отверстия и т.п.), рекомендуется использовать станки, имеющие сложную форму траектории колебаний. Такие станки вместо обычной круговой или эллипсной траектории позволяют усложнить траекторию колебаний рабочей камеры и, соответственно, циркуляционные потоки рабочей среды,

Выбор характеристики рабочей среды оказывает большое влияние на производительность ВиАО и качество обработанной поверхности. При осуществлении черновых операций рекомендуется применять абразивные гранулы повышенной зернистости: для грубого шлифования - 25 - 63; для очистки от окалины и коррозии - 40 - 125; при чистовом шлифовании рекомендуется использовать гранулы зернистости 8 - 25, при полировании используются гранулы зернистости M28-M63, а также фарфоровые шары и природные гранулированные рабочие среды. При этом следует учитывать, что с уменьшением зернистости шероховатость обработанной поверхности уменьшается, но одновременно снижается интенсивность съема металла, что приводит к снижению производительности.

Размеры и форму абразивных гранул выбирают в зависимости от конфигурации деталей. Для деталей, не имеющих пазов и отверстий, размер абразивных гранул может быть 15 - 30 мм. При наличии пазов, отверстий, труднодоступных мест размер гранул выбирается таким образом, чтобы обеспечить их доступ ко всем участкам обрабатываемой поверхности. Для деталей сложной конфигурации можно использовать смесь абразивных гранул различных размеров, при этом меньшие гранулы обеспечивают обработку труднодоступных мест, а большие гранулы повышают производительность обработки.

Форма гранул также оказывает влияние на производительность обработки, при этом лучшие результаты обеспечивают гранулы в форме пирамид и конусов, а затем в форме различных призм, звездочек, цилиндров и шаров.

Известно, что абразивные материалы могут иметь различную твердость. При абразивной обработке для обеспечения высокой износостойкости абразивных гранул рекомендуется применять гранулы твердости ВТ и ЧТ. В последнее время разработаны и внедрены в производство специальные полимерные связки, используемые в качестве рабочих сред при вибрационной обработке. Структура гранул при использовании керамических

связок выбирается таким образом, чтобы обеспечить размещение стружки между абразивными зернами и уменьшение трения связки об обрабатываемую поверхность.

Выбор времени обработки зависит от вида операции. Продолжительность процесса может изменяться от 10 мин до 16 - 20 часов. Чаще всего оно подбирается опытным путем. Однако полученные при исследовании ВиАО сведения позволяют осуществлять расчеты времени обработки.

#### **4.5. Магнитно-абразивная обработка**

Под магнитно-абразивной обработкой (МАО) понимают способ физико-механической обработки, который основан на взаимодействии ферроабразивного порошка, сформированного магнитным полем, которое выполняет роль «виртуальной» связки, в порошок магнитно-абразивный инструмент (МАИ) с поверхностью обрабатываемой заготовки с целью обеспечения заданных микрогеометрических и физико-механических свойств детали. По своему воздействию на обрабатываемую поверхность метод МАО можно отнести к финишным – полирование с элементами упрочнения поверхностного слоя.

Работы Е.Г. Коновалова, Г.С. Шулева, Ф.Ю. Сакулевича, Ю.М. Барона [23-28] являются первыми фундаментальными разработками в данном направлении. В них сделаны первые попытки установить физическую сущность явлений, которые происходят в процессе МАО, механизмы разрушения материала и снижения шероховатости обрабатываемых поверхностей, в том числе и за счет пластической деформации. Существенным вкладом в развитие метода МАО являются работы В.Ю. Оликера [29], в которых обобщена и систематизирована информация о материалах, используемых в качестве магнитно-абразивных порошков, реализованы методы целенаправленного формирования их структуры и свойств для обработки конкретных типов материалов, разработана целая гамма новых универсальных порошковых материалов, полученных методом распыления из расплава, а технологии их изготовления доведены до промышленного уровня.

Эффективность МАО обеспечивается при соблюдении трех основных взаимосвязанных условий.

1. Достижением равномерного прижима частиц магнитно-абразивного порошка к каждому участку обрабатываемой поверхности при МАО, что обеспечивается силами магнитного происхождения в комплексе с динамическими и кинематическими особенностями движения заготовки в рабочих зазорах магнитно-абразивных станков.

2. Наличием достаточной и равномерно распределенной по обрабатываемой поверхности тангенциальной составляющей скорости

относительного перемещения частиц магнитно-абразивного порошка по поверхности обрабатываемой заготовки, что обеспечивается траекторией и характером ее движения в магнитных зазорах и зависит от формы каждой конкретной детали.

3. Активным перемешиванием частиц МАИ в зонах обработки, их способностью к формированию и восстановлению формы порошкового квазистабильного инструмента в процессе МАО, что во многом зависит от конструкции магнитной системы, условий расположения деталей в зонах обработки, применением дополнительных устройств, обеспечивающих восстановление формы МАИ и его характеристик в объеме рабочих зон.

Особенностями процесса магнитно-абразивной обработки, которые позитивно отличают данный метод от традиционной финишной обработки – таких как струйно-абразивное шлифование, обработка специальными щетками, абразивная обработка жестко связанным абразивным или эластичным инструментом, являются следующие:

1. Непрерывный контакт абразива с поверхностью изделия, что снижает цикл нагрузки на технологическую систему и способствует повышению точности детали.

2. Отсутствие жесткого крепления абразива в инструменте, что способствует самопроизвольному нивелированию абразивного инструмента относительно сложной формы обрабатываемой детали. При этом устраняется вероятность появления в зоне резания критических давлений и температур, увеличивается стойкость зерен, повышаются физико-механические свойства поверхностного слоя детали.

3. Возможность управления в широком диапазоне жесткостью МАИ, что позволяет выполнять совмещение черновой, чистовой, финишной операций обработки без смены технологических баз и переустановки детали.

4. Отсутствие связи трения о твердую поверхность существенно снижает температуру абразивной обработки.

5. Возможность резания всегда наиболее острой кромкой абразивного зерна, исключение из технологического цикла правки и перезаточки «абразивного инструмента».

6. Возможность проникновение стружки между зернами абразива, что устраняет вероятность засаливания инструмента и исключает процесс приработки инструмента. Это обеспечивает постоянный съём материала в процессе всего периода обработки и позволяет обрабатывать широкий спектр материалов от мягких и не термообработанных до твердых и вязких.

7. Возможность упрочнения поверхностного слоя детали за счет формирования наклепанного поверхностного слоя, снижения в нем остаточных напряжений и перевода их в сжимающие.

8. Формирование шероховатости с  $Ra < 0,1$  мкм с высокой величиной опорной поверхности микропрофиля.

9. Повышенная интенсивность обработки.
10. Высокая производительность - в 3-5 раза выше, чем обычные методы шлифования.
11. Независимость от квалификации рабочего.
12. Применение МАО позволяет в 8-10 раз уменьшить штучное время обработки.
13. Возможность автоматизации процесса и быстрой смены абразивного инструмента.

#### **4.5.1. Основные составляющие метода МАО**

Метод МАО занимает промежуточное положение между абразивной обработкой жестко связанным абразивом и свободным. Основными элементами, обеспечивающими реализацию данного метода, являются:

- магнитная система, которая изготавливается на базе электромагнитов или постоянных магнитов. Основные ее функции:

- создание условий для обеспечения силового нагружения рабочих элементов посредством передачи магнитной энергии через конструктивные элементы (полюсные наконечники) к ферроабразивным частичкам и их формирование в рабочих зонах;
- формообразование магнитно-абразивного порошка в рабочих магнитных зазорах в процессе МАО в МАИ;
- возможность плавного изменения жесткости формирующегося МАИ путем регулирования величины магнитного поля в рабочих зазорах.

- магнитно-абразивный порошок выполняет роль режущих, стирающих и выглаживающих элементов. Такая его способность определяется размером и формой частиц, составом, магнитными и абразивными свойствами, характером распределения абразивных элементов в порошке и их размерами, механическими свойствами частиц, специальными реологическими характеристиками, степенью адгезионного взаимодействия между частицами порошка и обрабатываемой заготовкой.

Обрабатываемая деталь, форма которой и ставящаяся задача обработки определяют характер ее перемещения в МАИ при МАО. То есть определяет траекторию и скорость движения, а, значит, и устройство (механизм), который обеспечивает реализацию подобной задачи.

#### **4.5.2. Краткая характеристика методов и схем для реализации процесса магнитно-абразивной обработки**

Метод магнитно-абразивной обработки реализуется в значительном количестве схем (более 250), которые отличаются один от другого рядом параметров. Известно несколько подходов к классификации методов и схем магнитно-абразивной обработки, а именно по:

- относительным движениям обрабатываемых деталей в зонах обработки[4],

- видам обрабатываемых поверхностей [30],
- функциональному использованию энергии магнитного поля [24,25].

Удобной является классификация схем и устройств для магнитно-абразивной обработки, приведенная в [31], которая позволяет упростить выбор схемы магнитно-абразивной обработки при известной конфигурации обрабатываемой детали на начальных стадиях разработки технологического процесса.

Для магнитно-абразивной обработки деталей типа тел вращения чаще всего применяется схема, которая предусматривает жесткое крепление обрабатываемой заготовки в центрах, между роликами, консольно относительно полюсов постоянных магнитов так, чтобы между полюсами и обрабатываемой поверхностью оставались зазоры, которые заполняются магнитно-абразивным порошком (рис. 4.41). При этом полюсные наконечники магнитной системы, в зависимости от габаритов обрабатываемой детали, могут или располагаться с одной стороны обрабатываемой детали или с противоположных.

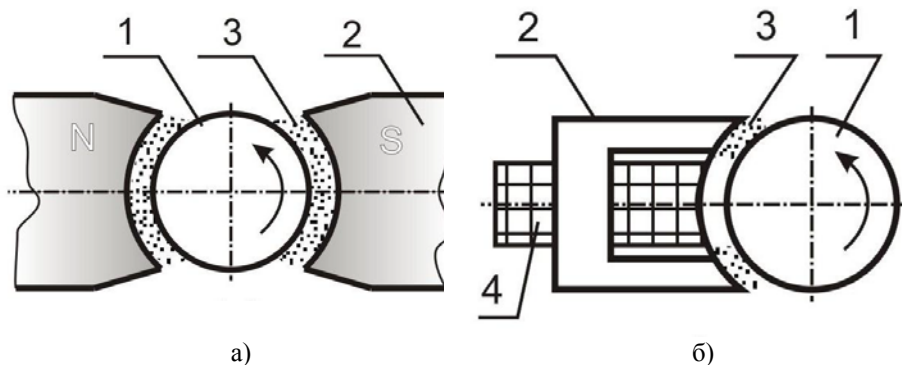


Рисунок 4.41 – Схема МАО цилиндрических деталей:

- а) с двухсторонним , б) односторонним размещением рабочих зазоров  
 1 – заготовка, 2 – полюсный наконечник, 3 – магнитно-абразивный порошок,  
 4 – катушка электромагнитная

Магнитное поле, создаваемое электромагнитами постоянного тока или постоянными магнитами, при реализации процесса МАО применяется для удержания магнитно-абразивного порошка в магнитном зазоре в рабочем состоянии, а обрабатываемая заготовка выполняет вращательное и осциллирующее движения, которые могут быть совмещены интегрально с продольной или поперечной подачей. Увеличение производительности обработки достигается за счет уменьшения времени замены изделий путем использования разных вариантов безцентральной обработки [32-34], где

используют ведущие и прижимные ролики, опорные ножи и тому подобное. Предложены разные устройства для осцилляции, как обрабатываемых деталей, так и полюсных наконечников [35,36]. Известные способы и устройства для MAO, как правило, ориентированные на обработку ферромагнитных деталей в условиях малых магнитных зазоров – расстояние между обрабатываемой поверхностью и поверхностью полюсного наконечника составляет от 0.3 до 1.5-2 мм, что соответствует величине 3-10 характерных размеров частиц порошка. При этом в рабочих зонах формируется магнитное поле с величиной магнитной индукции в пределах 0,8-1,1 Тл. Основной силой, что прижимает абразивные зерна к поверхностям деталей, является сила магнитного поля. Использование таких схем для обработки немагнитных деталей неэффективно из-за сложности создания достаточных для обработки сил только за счет сил магнитного происхождения. Поэтому необходимым становится использование динамического прижима магнитно-абразивного порошка к обрабатываемым поверхностям. А это ведет к росту скоростей MAO. При этом в [25] отмечается, что при скоростях MAO свыше 3-3,5 м/с имеет место выбрасывание порошка из зон обработки и, как результат, потеря работоспособности МАИ.

При реализации схем MAO тел вращения, которые предусматривают активное движение МАИ можно выделить случаи движения последнего за счет перемещения магнитной системы постоянного тока и за счет создания бегущего магнитного поля. Одной из первых конструкций, которые используют энергию бегущего магнитного поля, есть устройство, описанное в [37]. Оно имеет по крайней мере четыре электромагнитные катушки, подключенные к двум или более источникам переменного тока, которые смещены по фазе и расположены по кругу попарно, что позволяет образовывать бегущее магнитное поле, обеспечивающие движение магнитно-абразивного порошка относительно обрабатываемой детали. Одним из вариантов создания активно двигающегося магнитно-абразивного инструмента является схема обработки, в которой магнитно-абразивный порошок удерживается постоянным магнитным полем в стационарном состоянии в барабане, а вращающееся магнитное поле приводит во вращение барабан. Использование механических устройств перемещения порошка является типичным для конструкции, описанной в [38], где деталь закреплена неподвижно, а вращение передается электромагнитам, которые удерживают порошок и имеют вид электромагнитной головки щелевого типа.

Обработку внутренних поверхностей, например, отверстий в деталях, выполняют с помощью внутреннего полюсного наконечника, который вращается. При этом сама деталь выполняет роль противоположного полюсного наконечника [39]. Для обработки внутренних поверхностей труб используют электромагнитные индукторы, которые располагаются снаружи

трубы [40, 41], а магнитно-абразивный порошок – внутри. Таким образом выполняется обработка внутренних поверхностей даже шестигранных труб (рис. 4.42).

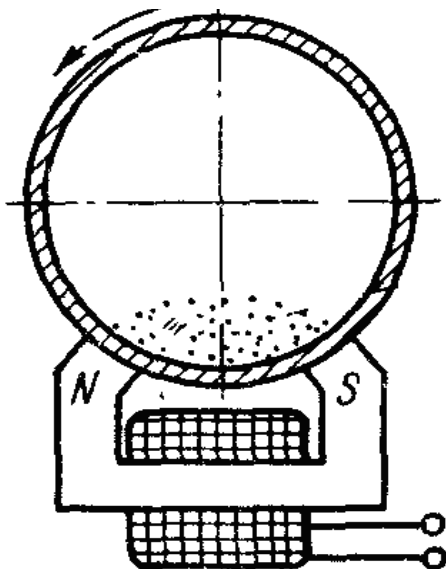


Рисунок 4.42 – Схема МАО внутренних поверхностей деталей

При обработке деталей с плоскими поверхностями наиболее распространены схемы обработки торцевой или периферийной головкой. В такой схеме МАО изделие может находиться в покое или принимать участие в простом либо комбинированном движении. Применяются схемы обработки между валками, которые встречно вращаются и представляют собой полюсные наконечники магнитной системы [23,28]. Указанным схемам присущие недостатки, которые указаны выше. Более разнообразные схемы обработки деталей сложной формы, поскольку сами детали, которые относятся к этому классу, разнообразнее. К устройствам МАО деталей сложной пространственной формы относятся установки и способы объемной обработки сложных фасонных поверхностей, концевой инструмента, твердосплавных неперетачиваемых пластин, лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) и другие. Наибольшее распространение получила схема обработки, которая содержит кольцевую камеру и магнитную систему с магнитопроводом, оборудованную полюсными наконечниками, коаксиально расположенными с противоположных сторон камеры, в которой формируется МАИ и совершает сложное движение обрабатываемая деталь (рис. 4.43).

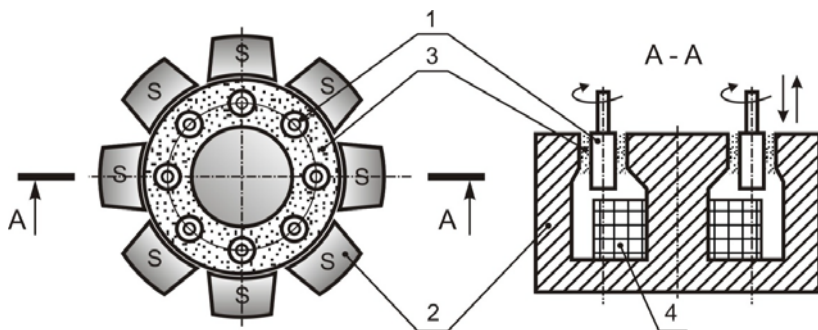
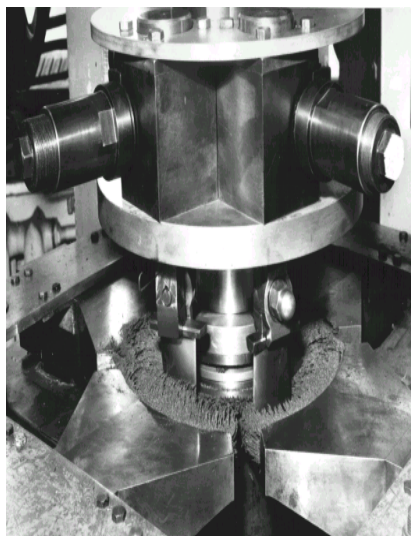


Рисунок 4.43 – Схема установки типа «кольцевая ванна». 1 – заготовки, 2 – полюсные наконечники, 3 – магнитно-абразивный порошок, 4 – катушка электромагнита

Установка для MAO лопаток ГТД обеспечивает создание МАИ с заданными свойствами в рабочем зазоре типа «кольцевая ванна», вращение обрабатываемых лопаток вокруг оси кольцевой ванны, плавное введение лопатки в зону обработки, колебания лопатки вокруг оси крепления и осцилляцию вдоль этой оси [42,43]. Для MAO больших лопаток со значительным углом закрутки предусмотрен механизм заданного, плавного поворота лопаток в зависимости от высоты детали. Разработанная установка может быть собрана на базе вертикально-фрезерного станка типа ЛФ-260, МА-633 и подобных станках с подвижным шпинделем. Внешний вид установки приведен на рис. 4.44, а ее принципиальная схема на рис. 4.45.

На горизонтальном столе станка размещается (рис. 4.45) магнитная система, которая состоит из разветвленного, симметричного магнитопровода 1 с коаксиально расположенными полюсными наконечниками, которые образуют между полюсами кольцевую рабочую зону 11 и катушек 2 электромагнитов постоянного тока. На столе, перпендикулярно к его плоскости вдоль оси кольцевой зоны, установлен с возможностью вращения вал 12, на котором с регулируемым эксцентриситетом  $\mathcal{E}$  установлен профильный копир 7. На шпинделе станка, который имеет возможность регулируемого вертикального перемещения, соосно с валом 12 установлена роторная головка 6, внешний вид которой в рабочем положении показан на рисунке 4. В роторной головке расположены радиально подвижные подпружиненные зубчатые рейки 3. На концах реек, обращенных к оси ротора, закреплены ролики 8, которые находятся в контакте с профильным копиром 7. Рейки 3 зацепленные с соответствующими шестернями 4 коаксиальных шпинделей 5, установленных в роторной головке 6. В шпинделях 5 предусмотрены державки 9 для крепления обрабатываемых лопаток 10.



а)

б)

Рисунок 4.44 – Внешний вид станка (а) и рабочей зоны (б) для МАО лопаток ГТД

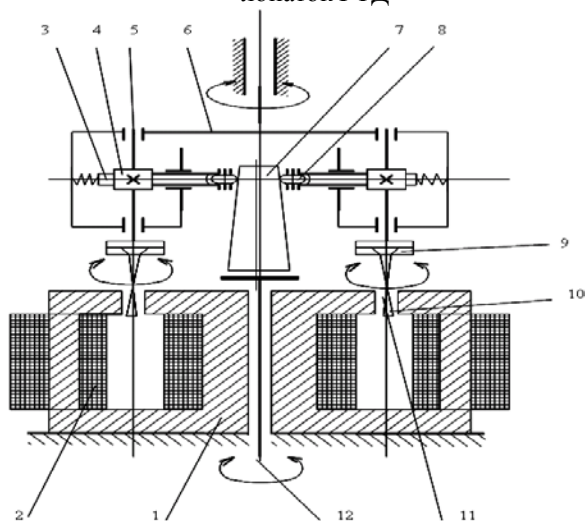


Рисунок 4.45 – Схема установки для магнитно-абразивной обработки лопаток ГТД

Универсальная головка состоит из пяти модулей (рис 4.46): приводного 1, раздающего 2, углового 3, промежуточного 4 и шпиндельного 5.

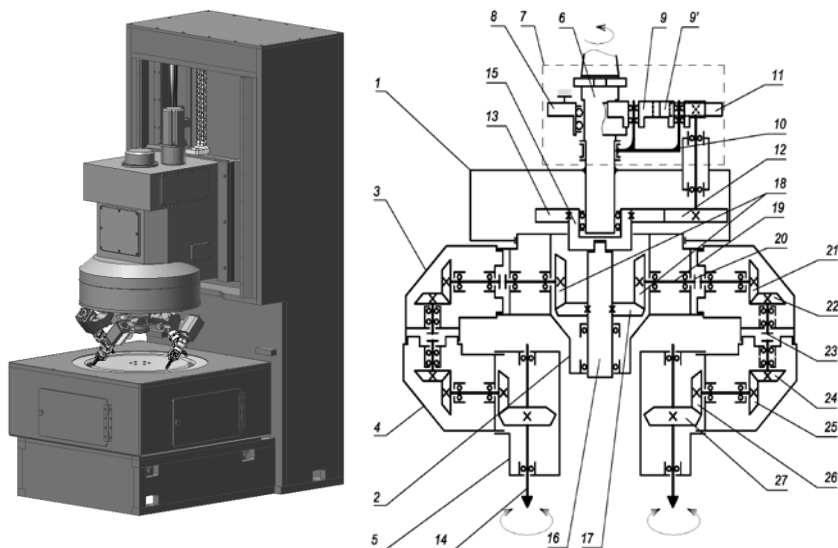


Рисунок 4.46 – Модель станка для МАО концевой режущего инструмента и принципиальная схема рабочей головки

Приводной модуль 1 крепится в шпинделе станка, например фрезерного, по инструментальному конусу на оправке 6. Механизм отбора мощности 7 состоит из неподвижного, относительно шпиндельной бабки станка, центрального цилиндрического колеса 8, установленного на оправке 6 на подшипниках, и паразитарных шестерен 9 и 9', установленных на поворотной относительно оправки 6 плите 10 и соединенных с одной стороны с центральным цилиндрическим колесом 8, и с другой стороны с гитарой переменных колес 11, 12 и 13. Неподвижно соединенный с приводным модулем 1, раздающий модуль 2, содержит равномерно расположенные по кругу, последовательно соединены угловые модули 3, передаточные 4 и шпиндельные 5, которые могут вращаться один относительно другого и относительно раздающего модуля, и предназначенные для придания заготовке правильного пространственного положения. Кинематическая цепь, которая соединяет гитару сменных колес 11, 12, 13 с рабочими шпинделями 14 шпиндельного модуля 5, состоит из стакана 15, расположенного внизу оправки 6, который соединен с валом 16 раздающего модуля 2, например, торцевым или радиальным шлицем, вала 16 с закрепленным на нем

центральным коническим колесом 17, соединенным с коническим колесом-сателлитом 18, которое закреплено на радиально расположенному валу 19, муфты 20, конической передачи 21-22, муфты 23, конических передач 24-25, 26-27. На рабочих шпинделях закрепляются зажимные устройства с заготовками (на схеме не показаны). Зубчатые колеса 11, 12 и 13 составляют гитару сменных колес. В первую очередь для изменения передаточного числа кинематической цепи от центрального колеса 8 к рабочему шпинделю 14 используется зубчатое колесо 11, как наиболее доступное, и во вторую очередь пара колес 12 и 13.

Внешний вид станка и его рабочей головки [44] представлен на рис. 4.47.



Рисунок 4.47 – Станок и его рабочая головка для МАО  
концевого режущего инструмента

Для обработки зубчатых и винтовых поверхностей, удаления заусенок разработаны станки на базе токарных [45], модель которых представлена на рис. 4.48.

Для обработки изделий сложной пространственной формы можно также применить разного типа торцевые и радиальные головки, которые используют для обработки плоских поверхностей. Они могут использоваться как наладки к стандартному металлорежущему оборудованию, а также на ручном инструменте.

Как и в случае схем обработки деталей простых форм при МАО деталей с фасонными поверхностями магнитное поле выполняет функции виртуальной связки, которая обеспечивает прижим МАИ с целью создания сил резания.

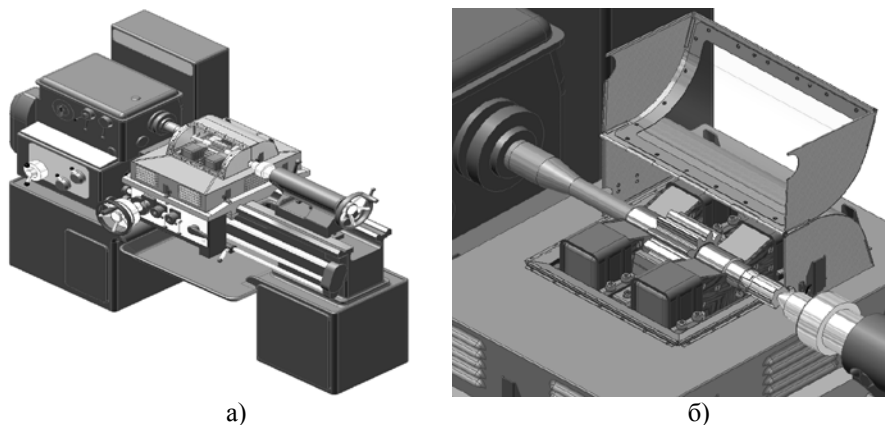


Рисунок 4.48 – Производственный станок для MAO валов-шестерен насосов:  
а) – общий вид; б) – рабочая зона

Но эффективность известных методов MAO недостаточна в связи с тем, что не учитываются и не реализуются позитивные свойства МАИ, такие как его подвижность в рабочих зазорах, возможность нивелировать относительно обрабатываемой поверхности, реологические свойства.

#### 4.5.3. Порошковые материалы, применяемые при MAO

Важным элементом процесса MAO являются магнитно-абразивные порошки (МАП), которые традиционно подразделяются на:

- а) механические смеси, состоящие из ферромагнитных и абразивных порошков;
- б) шаржированные порошки;
- в) керметные порошки – порошки, полученные методами порошковой металлургии по технологической схеме: смешивание компонентов + спекание + размол;
- г) плакированные порошки – порошки, у которых ферромагнитная основа покрывается твердым абразивным материалом;
- д) порошки, полученные методом многократного проката с последующим спеканием;
- в) порошки, распыленные из расплавов.

**Механические смеси** – составы, сформированные из намагниченных частиц, которые в зависимости от условий эксплуатации могут состоять из:

- 1) Магнитомягких либо магнитотвердых материалов.

Магнитомягкие материалы (железо или легированное железо) используются при работе в постоянном магнитном поле, они легко намагничиваются и размагничиваются, имеют малое значение коэрцитивной силы ( $H_c$ ). Магнитотвердые материалы (ферриты, сплавы Fe-Ni-Al, Fe-Ni-Al-

Со) используются при работе в переменном магнитном поле. В механических смесях для MAO часто используют гексоферрит бария ( $BaO \cdot 6Fe_2O_3$ ) с высоким значением  $H_c = (1,3-1,6) \cdot 10^5$  А/м и остаточной индукцией  $B = 0,2-0,4$  Тл, материалы на основе сплавов Fe-Ni-Al, Fe-Ni-Al-Co. Их свойства несколько ниже  $H_c = 0,4 \cdot 10^5$  А/м и  $B = 0,1-0,2$  Тл.

2) Абразивных частиц (алмаз, эльбор, корунд, карбид кремния, карбид бора).

- Алмаз наибольшее распространение в качестве абразивных элементов при MAO получили микропорошки и алмазные пасты на их основе (АСМ, АСН) зернистостью 60/40...1/0. Предпочтительная область применения в составе механических смесей – MAO керамических материалов, твердых сплавов, напыленных покрытий на основе TiC, TiN, CrN, MoN, также закаленных стали.

- Эльбор (КНБ) – применяется в механических смесях для MAO вместе с связующими жидкостями (масло, парафин, стеарин) для избегания агрегации и расслоения механических смесей в процессе обработки. Область применения при MAO – обработка быстрорежущей стали, твердых и вязких специальных сплавов.

- Карбид бора  $B_4C$  используют в виде паст при обработке твердых сплавов, доводке инструментальных материалов.

- Карбид кремния SiC. Область применения при MAO – обработка нержавеющей аустенитной стали, чугуна, меди, латуни, алюминиевых сплавов, бронзы.

- Корунд – материал на основе оксида алюминия  $Al_2O_3$ . Область применения – MAO деталей из стали (от мягких до легированных) и специальных сплавов.

Механические смеси применяются в устройствах, в которых порошковая масса движется под действием бегущих магнитных полей и на установках типа кольцевая ванна с использованием суспензий, в состав которых входят поверхностно активные вещества (ПАВ).

К классу механических смесей при MAO относят также магнитно-реологические инструменты. Представляют собой суспензию, в которой дисперсная фаза представлена частицами железа и абразива, распределенными в жидкой дисперсионной среде, в качестве которой чаще всего используют воду или глицерин. В качестве магнитных элементов чаще всего используют карбонильное железо и постоянно намагниченные частицы гексоферрита бария. Содержание жидкости в магнито-реологическом инструменте ~ 10% от всей массы. Под действием магнитного поля магнито-реологический инструмент затвердевает и в таком виде используется для обработки преимущественно для полирования.

Использование механических смесей для круглого и плоского полирования в схемах MAO, которые предусматривают удержание МАИ,

сформированного из механических смесей, не нашло применения, так как наблюдается выпадение абразивных частиц из инструмента.

*Достоинства механических смесей:* Легко изготавливаются самим потребителем, в их состав можно вводить любые абразивные материалы.

*Недостатки механических смесей:* механические смеси сегрегируют на составляющие, как в процессе эксплуатации, так и при хранении и имеют низкие магнитные свойства из-за содержания повышенного количества немагнитной абразивной фазы.

**Шаржированные порошки** – разновидность механических смесей (МС). Абразивные частицы с размером 1-20 мкм натирают на поверхность магнитных частиц. Такие порошки не сегрегируют, но работоспособность у них не высокая – до момента истирания поверхностного слоя (шаржированного).

**Керметные порошки** – получают методом порошковой металлургии. Типичные, наиболее распространенные порошки МАМ 40, Ж15КТ, ПФО Р6М5. Классическая схема получения подобных порошков: смешивание ферромагнитных и абразивных порошков → брикетирование или прессование приготовленных смесей → спекание в присутствии восстановительной среды → размол спеченных заготовок → классификация → магнитная сепарация. На рисунке 4.49 показана принципиальная схема получения порошковых МАМ методом прокатки.

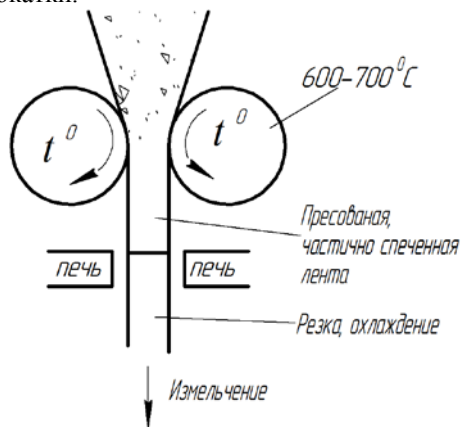


Рисунок 4.49 – Принципиальная схема получения порошковых МАМ методом прокатки

Первые порошки: МАМ 40 → Fe-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Вместе с тем, стойкость таких порошков относительно невысокая (≈5мин) из-за того, что отсутствует прочное сцепление абразива с ферромагнитной основой, так как в данном случае крепление чисто механическое. В процессе спекания Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> не

смачивается, не проходят фазовые взаимодействия, в результате чего поэтому при размоле значительная часть абразива высыпается.


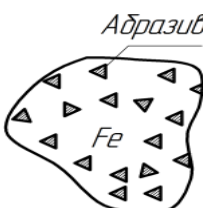
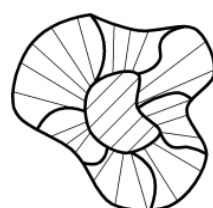

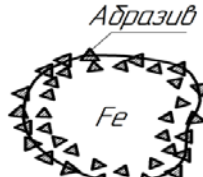
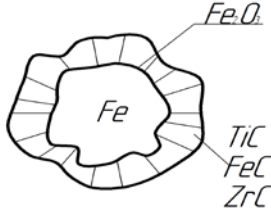
Более современные керметные порошки – порошки, которые в качестве абразивной составляющей используют карбиды и бориды элементов IV-V групп. Карбиды – TiC, SiC, Mo<sub>2</sub>C<sub>3</sub>, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, ZrC. Бориды – TiB<sub>2</sub>, ZrB<sub>2</sub>, W<sub>2</sub>B<sub>5</sub>. Наиболее высокие свойства имеет порошок с TiC. Промышленное название Ж15КТ. Эти порошки более стойкие из-за того, что в процессе спекания на границе раздела Fe – карбид образуется двойная эвтектика Fe-Ti-C. Однако при размолу у керметных порошков наблюдается выкрашивание абразивной составляющей (до 40%). Кроме того, при производстве таких порошков в их составе остается много свободного углерода, который при MAO засаливает обрабатываемую поверхность. Для повышения прочности сцепления абразива и ферромагнитной основы при производстве МАП вводят либо легкоплавкую компоненту, например, медь, либо процесс спекания выполняют в присутствии жидкой фазы, когда одновременно со спеканием происходит синтез абразивных компонент. В ряде случаев используют технологию СВС (самораспространяющийся высокотемпературный синтез).

**Плакированные порошки** – порошки, у которых ферромагнитная основа покрывается абразивной компонентой, например, окисленные порошки (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – абразив), покрытые карбидами в режиме осаждения карбидов на поверхность Fe. К *недостаткам* таких порошковых магнитно-абразивных материалов следует отнести тот факт, что в результате изнашивания покрытия на частичках имеет место резкое снижение их работоспособности. К *преимуществам* - простота изготовления, возможность восстановления.

**Литые порошки** – частицы закристаллизовываются из жидкого состояния материала. К этой группе относится подгруппа материалов, широко применяемых в промышленности для различных целей – чугуны, закаленные стали, ферросплавы (ферробор, ферротитан, ферровольфрам) и магнитные сплавы (альсифер, амперм). Порошки из таких материалов могут быть получены самим потребителем или дроблением, или резанием и последующим размолем стружки. Широко используется дробь чугунная колотая (ДЧК), (СП-17), распыленные порошки быстрорежущих сталей – ПР Р6М5. К специально изготавливаемым магнитно-абразивным порошкам относят порошки типа Полимам-Т, Полимам-М, Царамам, Ферромап.

**Порошки получены методом прокатки.** К порошкам подобного вида относят порошки типа Фробраз, полученные путем модификации и комбинирования процессов механического смешивания, шаржирования и технологии получения керметных порошков. Предварительно сформированные механические смеси прокатываются через горячие валики, а формирующаяся лента допекается и впоследствии размалывается. В отличие от керметной технологии процесс прессования или брикетирования заменяется процессом прокатки.

По структурному фактору зерна магнитно-абразивных порошковых материалов в зависимости от технологии их изготовления традиционно представляют в виде **5 классов**:

<b>I.</b>		<p>Порошки получены распылением из расплава. Имеют однородную структуру без явно выраженных режущих центров. Частички имеют относительно не высокую твердость и используют для финишной обработки цветных и специальных сплавов, когда необходимо лишь улучшить Ra без значительных съемов.</p>
<b>II.</b>	а) керметные	б) керметные+оплавленные, полученные методом СВС
		
<b>III.</b>		<p>Однослойные дискретные покрытия на частичках. Получены путем прокатки или шаржирования</p>
<b>IV.</b>		<p>Многослойные дискретные покрытия из абразивных частиц на ферромагнитной матрице</p>
<b>V.</b>		<p>Непрерывное покрытие</p>

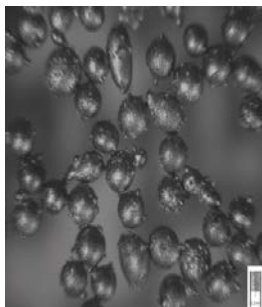
III-V класс имеют повышенные магнитные и абразивные свойства. Однако по мере изнашивания абразивного слоя их режущие свойства резко снижаются.

Кроме различий по химическому составу, структурным характеристикам порошки различают (рис. 4.50):

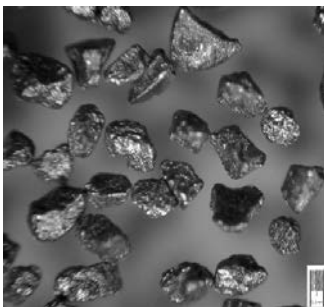
1. **По размеру** – используют порошковые магнитно-абразивные материалы с размером частиц от 1000/630мкм до 63/50 мкм;

2. **По форме частиц** МАМ бывают:

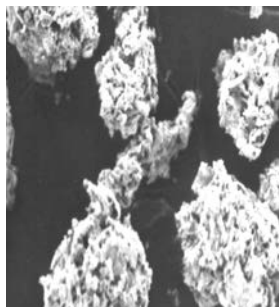
*округлые*



*оскольчатые*

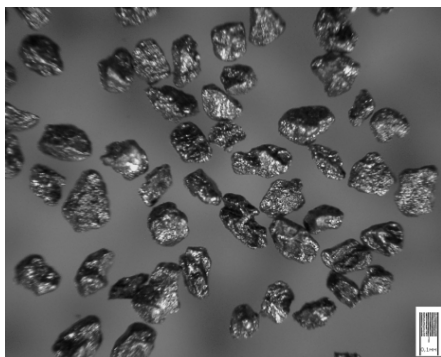


*разветвленные*



3. **По степени неравноосности:**

*равноосные*



*неравноосные*

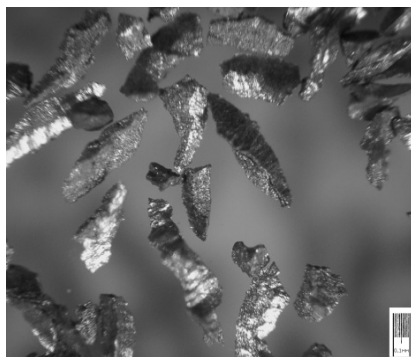


Рисунок 4.50 – Форма частиц магнитно-абразивных порошков

Эксплуатационные характеристики магнитно-абразивных порошков в составе МАИ оценивается по:

- изменению величины удельного сема материала с обрабатываемой поверхности в зависимости от времени обработки (рис. 4.51).
- изменению шероховатости поверхности обрабатываемых материалов от времени эксплуатации МАИ (рис. 4.52)



Рисунок 4.51 – Изменение величины удельного сема материала с обрабатываемой поверхности в зависимости от времени обработки

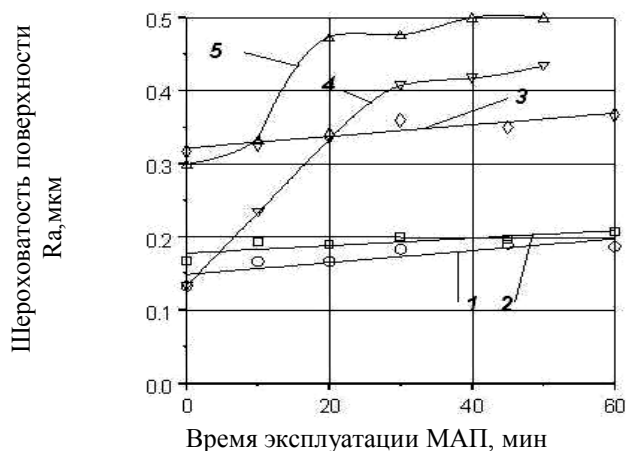


Рисунок 4.52 – Изменение шероховатости поверхности образцов, изготовленных из стали 45 от времени эксплуатации МАИ, сформированных из порошков: Полимам-Т – кривая 1, Ферромап – 2, Царамам – 3, Ж15КТ – 4, ПФО Р6М5 – 5

#### 4.5.4. Конструктивные особенности формообразующих МАИ элементов

Одними из основных конструктивно-технологических элементов метода MAO, которые в значительной степени определяют эффективность его применения для обработки различных деталей являются форма зон обработки и **формообразующие рабочую зону элементы**, которые подразделяется:

- по величине:

а) с малым рабочим зазором, когда расстояние между обрабатываемой поверхностью и полюсными наконечниками магнитной системы составляет порядка 3-5 средних диаметров частиц порошка.

б) с большим зазором, когда это расстояние значительно превышает (в 10 и более раз) средний диаметр частиц.

- по форме рабочих зазоров их делят на эквидистантные; не эквидистантные; коаксиальные; эллипсовидные; серповидные (рис. 4.53);

- по степени прерывности:

а) кольцевые (непрерывные);

б) прерывистые: состоящие из нескольких зазоров;

в) с концентраторами магнитного потока в виде выступов и впадин различной формы и конфигурации (рис. 4.54), вмонтированных в полюсные наконечники диамагнитных вставок или постоянных магнитов, то есть специальные конструктивные элементы, изменяющие градиент и конфигурацию магнитного поля в рабочих зазорах.

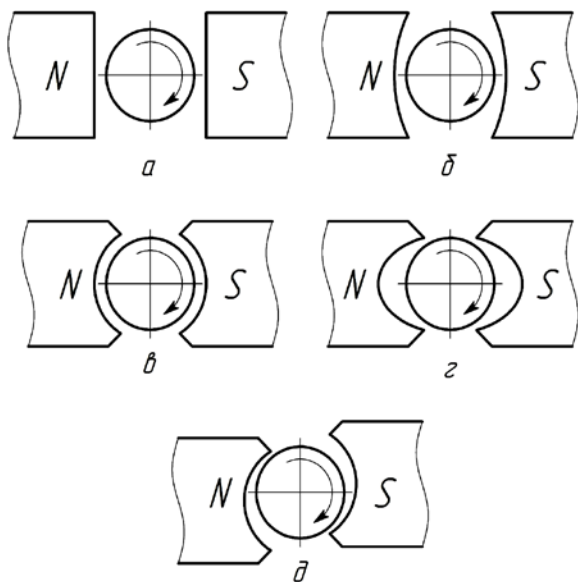


Рисунок 4.53 – Типы рабочих зазоров станков для MAO: а) эквидистантные; б) не эквидистантные; в) коаксиальные; г) эллипсовидные; д) серповидный

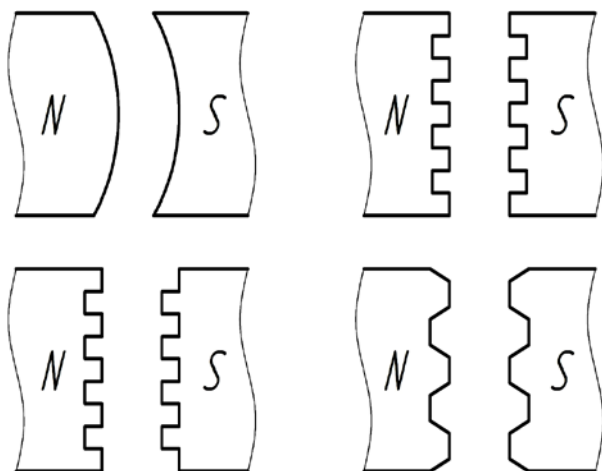


Рисунок 4.54 –  
Типичные виды  
концентраторов  
магнитного поля,  
наносимые на  
полюсные  
наконечники  
магнитных систем  
станков для МАО

#### 4.5.5. Основные закономерности процесса МАО

Процесс любой обработки сводится в конечном счете к решению определенных технологических задач:

1. Снятие (удаление) материала с поверхности заготовки для получения заданных размеров.
2. Формирование определенного микрорельефа поверхности
  - высота микронеровностей
  - определенной топографии микроповерхностей
3. Формирование поверхностного слоя деталей с заданными физико-механическими характеристиками.

Метод МАО позволяет эффективно решать вторую и третью задачи и частично первую.

**Основными технологическими параметрами при МАО являются (по степени важности):**

1. Величина магнитного поля, которая определяется жесткостью МАИ, характером движения (при использовании переменных полей) при обработке ферромагнитных заготовок с малым зазором.
2. Скорость относительного перемещения обрабатываемых поверхностей и МАИ (с малым зазором 2-е место, с большим – 1-е).
3. Условия и схемы обработки,
4. Размеры и форма рабочих зазоров.
5. Материал детали с его физическими свойствами и материал МАП (адгезионная совместимость и прочность частиц, абразивная и полирующая способность).
6. Длительность процесса МАО.

7. Размеры, форма частиц МАИ и фракционный состав порошкового инструмента.

8. Триботехнические свойства порошка как в паре МАИ – поверхность деталей, МАИ – МАИ в зависимости от условий MAO.

9. Реологические свойства МАИ – способность перемешиваться в процессе MAO, относительно обрабатываемой поверхности, восстанавливать и удерживать заданную форму.

10. Градиент магнитного поля в рабочих зазорах и его топография, которая в значительной степени определяется конструктивными способностями рабочих зон.

11. Специфическими физическими свойствами порошка:

- магнитная проницаемость;

- электросопротивление;

- прочность частиц и характер крепление абразивных частиц в ферромагнитной матрице.

12. Наличие/присутствие различных добавок: СОТС, абразивных частичек, специальных паст, растительных присадок и т.п.

Традиционно основными показателями эффективности процесса MAO является характер изменения шероховатости поверхности – Ra, величины массового съема материала с обрабатываемых поверхностей – q (рис. 4.55), физико-механических характеристик обрабатываемых поверхностей и минимально достижимая шероховатость поверхностей.

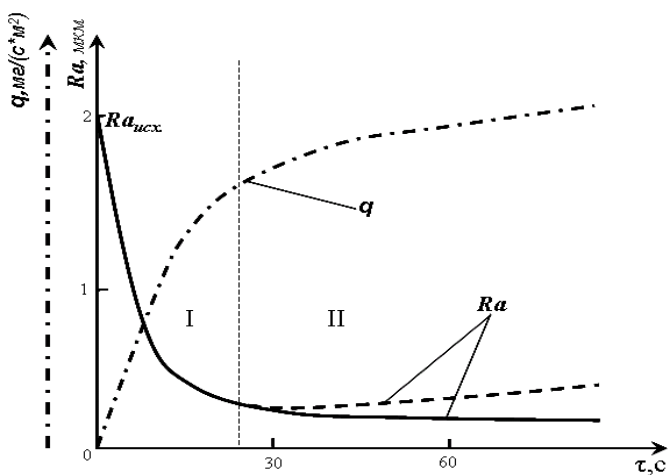


Рисунок 4.55 – Изменение параметра Ra и величины удельного съема материала в зависимости от времени MAO образцов из Ст.45 с исходной шероховатостью  $Ra=2$  мкм

При правильно подобранном типе порошка, его зернистости и режимах обработки за один технологический переход при MAO удастся получить шероховатость с  $Ra < 0,1-0,15 \mu\text{м}$ . Изменение параметра  $Ra$  от времени обработки описывается зависимостью гиперболического типа. Условно процесс MAO можно разделить на два этапа. На I этапе происходит резкое снижение высоты микронеровностей, сформированных на предыдущих стадиях обработки. Если прервать процесс MAO до завершения I этапа, то микропрофиль обрабатываемой поверхности будет характеризоваться, преимущественно, не выведенными следами микронеровностей, сформированными на предыдущих этапах обработки.

На II этапе MAO шероховатость характеризуется исключительно условиями обработки и физико-механическими свойствами поверхности обрабатываемого материала. После достижения «собственной» шероховатости в конце I этапа MAO высота микронеровностей может медленно снижаться или наоборот несколько увеличиваться. Уменьшение шероховатости объясняется или измельчением МАП в случае использования керметных порошков, или снижением его абразивных свойств при условии рационального использования и выбора СОТС. Увеличение параметра  $Ra$  на II этапе MAO связывают или с разупрочнением поверхностного слоя или с процессами шаржирования элементов МАП в обрабатываемую поверхность.

Для правильного выбора типа порошка необходимо учитывать химическое и адгезионное сродство материала порошка и детали, величины исходной шероховатости поверхности детали. Для правильного выбора размера частиц МАП пользуются следующими зависимостями. Оптимальный средний размер частиц МАП как правило равен:  $D_{opt.} \approx 190Ra_{исх.}$ . В случае, если средний размер частиц порошка  $D$  не соответствует величине  $D_{opt.}$ , то формируемая при MAO шероховатость может быть определена из соотношений:  $Ra = 13Ra_{исх.}^2 / D$  при  $D \leq D_{opt.}$  и  $Ra = 3,6 \cdot 10^{-4} D$  при  $D > D_{opt.}$ . Например, в случае, когда исходная шероховатость детали до MAO составляет  $Ra = 2 \mu\text{м}$ , то величина  $D_{opt.}$  будет равна  $D_{opt.} = 400 \mu\text{м}$ . При этом будет получена шероховатость поверхности  $Ra = 0,14 \mu\text{м}$ . Дальнейшее уменьшение шероховатости до  $Ra = 0,02 \mu\text{м}$  надо выполнять порошком со средним размером частиц  $D_{opt.} = 30 \mu\text{м}$ .

Немаловажным фактором при MAO, определяющим схему MAO и уровень магнитной индукции в рабочих зазорах, являются магнитные свойства деталей и их форма. При обработке ферромагнитных материалов и деталей с относительно простой формой – тела вращения, плоскости целесообразно использование схем обработки с малыми рабочими зазорами, когда основным фактором, обеспечивающим прижим частиц МАП к

обрабатываемой поверхности, являются силы магнитного поля, т.е. величина магнитной индукции –  $B$  в рабочем зазоре. При этом необходимо учитывать магнитные свойства МАП – прежде всего их магнитную проницаемость в рабочем состоянии –  $\mu$  и индукцию насыщения  $B_n$  (рис. 4.56), превышение которой нецелесообразно из-за роста энергетических затрат.

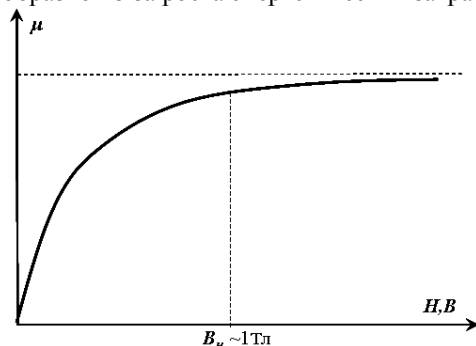


Рисунок 4.56 – Изменение магнитной проницаемости МАП в зависимости от напряженности магнитного поля в зонах обработки

Величина магнитной индукции в зонах обработки определяется из соотношения:  $B = \mu \mu_0 H$ , где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная,  $H$  – напряженность магнитного поля, которая определяется конструкцией магнитной системы, а для электромагнитных систем существенно зависит от параметра  $Iw$ , где  $I$  – сила тока в электромагнитных катушках, содержащих  $w$  витков. Для порошков, которые выпускаются серийно, индукция насыщения находится в пределах 0,6-1 Тл. При МАО с увеличением напряженности магнитного поля в магнитной системе станка возрастает магнитная индукция –  $B$  в зонах обработки. С ростом  $B$  до величины индукции насыщения  $B_n$  градиент  $B$  в зонах обработки направлен от полюсных наконечников к поверхности детали, а при  $B > B_n$  – на оборот – к полюсным наконечникам, т.е. преимущественная обработка будет осуществляться на полюсах.

При обработке деталей сложной пространственной конфигурации типа концевой режущего инструмента, многогранных неперетачиваемых твердосплавных пластин, лопаток газотурбинных двигателей, мелкоразмерных шестерен и других, а также деталей, изготовленных из пара- и диамагнитных материалов, целесообразно применение схемы типа кольцевая ванна с большими рабочими зазорами. При этом величина  $B$  в зонах обработки в межполюсном пространстве не будет превышать 0,5 Тл, а основным «нагружающим» МАИ фактором становится скорость перемещения деталей в зонах обработки и их траектория. Траектория и

характер расположения деталей в магнитных зазорах должны быть таким, чтобы обеспечивалось выполнение условий МАО, при которых на каждом малом участке поверхности реализовывалось равномерное обтекание МАИ со скоростью, достаточной для осуществления эффективного процесса обработки. Поэтому при МАО деталей сложных форм необходимо создание условий обработки, при которых МАИ будет равномерно «обтекать» обрабатываемые поверхности. Так при обработке по схеме, приведенной на рис. 4.43, будет активно обрабатываться только периферия концевой инструмента, но практически полностью необработанными остаются участки поверхности, расположенные в области канавок или пазов. Наклонное же базирование инструмента по отношению к направлению вращения вокруг оси кольцевой камеры (рис. 4.46, рис. 4.47) позволяет позитивно решить проблему равномерной обработки деталей типа концевой режущий инструмент. Поворот оси инструмента на некоторый угол относительно оси кольцевой ванны и расположения его в плоскости, сформированной осью инструмента и касательной к средней линии кольцевой ванны, показал, что наилучшие результаты – равномерная на всех передних и задних рабочих поверхностях, в стружкоотводящих канавках обработка и минимальная шероховатость получены для углов наклона  $50-70^\circ$ . Зависимость изменения шероховатости от угла расположения деталей в вертикальной плоскости, касательной к средней линии кольцевой ванны приведена на рис. 4.57. Для неперетачиваемых твердосплавных пластин применяется схема обработки, представленная на рис. 4.58.

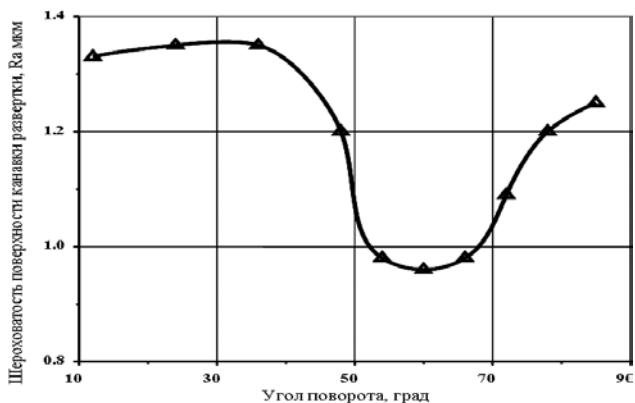


Рисунок 4.57 – Изменение шероховатости поверхности ножки зуба развертки в зависимости от угла наклона развертки относительно оси кольцевой ванны при МАО

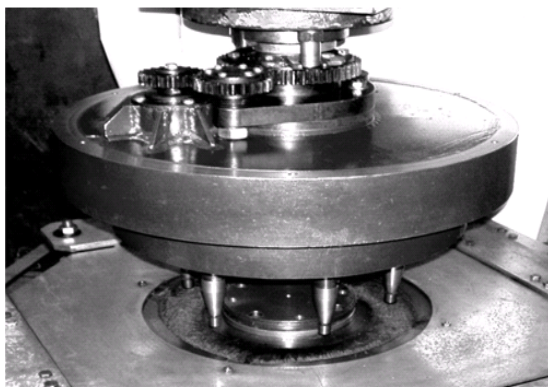


Рисунок 4.58 – Внешний вид головки для обработки непереключаемых сменных твердосплавных пластин

Детали, установленные на оправках, вращаются вокруг собственной оси и оси кольцевой камеры. Причем скорость вращения вокруг собственной оси – преимущественная.

#### 4.5.6. Скорость резания при МАО

При магнитно-абразивной обработке традиционно считается, что чем больше относительных движений совершает деталь в зоне обработки, тем эффективнее идет процесс обработки, тем более благоприятная сетка штрихов микронеровностей образуется на поверхности деталей. При этом скорость резания будет являться определяющей при оценке производительности процесса МАО. Как правило, при магнитно-абразивной обработке деталь совершает осциллирующее движение вдоль и вращение вокруг собственной оси, перемещение вдоль рабочей зоны. Скорость резания –  $V_p$  при МАО определяют как:

$$V_p = \sqrt{(V_g - V_z)^2 + V_0^2 + V_n^2}, \quad (4.3)$$

где  $V_g$  – скорость вращения вокруг собственной оси,  $V_0$  – скорость осцилляции,  $V_z$  – скорость перемещения зерен МАП,  $V_n$  – скорость перемещения вдоль рабочей камеры. Обычно на станках типа ФАС (ферроабразивный станок), МАРС (магнитно-абразивный роторный станок)  $V_g = 0 \div 5 \text{ м/с}$ ,  $V_z = 0 \div 0,05 \text{ м/с}$ ,  $V_0 = 0 \div 0,01 \text{ м/с}$ ,  $V_n = 0 \div 1 \text{ м/с}$ . На станках типа кольцевая ванна скорость перемещения вдоль рабочей камеры значительно выше и в ряде случаев может достигать 7-10 м/с. Определяющими эффективностью и производительность процесса МАО являются скорости  $V_g$  и  $V_n$ . Экспериментально установлено, что достигаемая минимальная шероховатость после МАО на установках с малым

рабочим зазором может быть определена как  $Ra_{\min} = k \left( \sqrt{V_g^2 + V_n^2} \right)^{-0,2}$ , где

$k$  – экспериментально определяемый коэффициент, который зависит от исходной шероховатости обрабатываемой поверхности, типа и фракционного состава магнитно-абразивного порошка и времени MAO. Следует отметить, что увеличение скорости обработки не всегда является желательными. При этом необходимо учитывать особенности формирования МАИ и его движения в зонах обработки. Так установлено, что при обработке ферромагнитных цилиндрических деталей по схеме, реализуемой на станке типа ФАС – схеме MAO с малым рабочим зазором – при скоростях вращения заготовок  $V_g > 3$  м/с начинается активное разбрасывание МАИ и его вытеснение из рабочей зоны. В результате этого снижается интенсивность и производительность процесса MAO. Осцилляция деталей вдоль собственной оси существенно не влияет на величину параметра Ra, но способствует формированию благоприятной сетки микронеровностей на обрабатываемой поверхности. При обработке цилиндрических образцов из низкоуглеродистых сталей, стали ШХ-15 экспериментальным путем была установлена связь между скоростью осцилляции и получаемой шероховатостью поверхностей в виде:  $Ra = CV_0^{-0,6}$ .

#### 4.5.7. Силы резания при MAO

Как на каждое зерно МАИ в процессе MAO, так и на саму обрабатываемую деталь действует комплекс сил. Для ферроабразивной порошковой среды, которая находится в магнитном поле и выполняет функции МАИ, этот комплекс сил можно представить в виде:

$$\overline{F_p} = \overline{F_m} + \overline{F_{M1}} + \overline{F_{эм}} + \overline{F_{ин}} + \overline{F_{уб}}, \quad (4.4)$$

где  $\overline{F_p}$  – суммарная сила резания;  $\overline{F_m} \approx (2 \div 10) \cdot 10^{-3}$  Н – сила магнитного происхождения от взаимодействия молекулярных токов материала зерна с внешним магнитным полем, которая описывается зависимостью:

$$\overline{F_m} = \frac{1}{\mu_0} v B \overline{grad B}, \quad \text{где } \mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} \text{ – магнитная постоянная,}$$

$v$  – объем ферромагнитного зерна,  $B$  – магнитная индукция в точке пространства, где расположено зерно,  $\overline{grad B}$  – вектор градиента магнитного индукции в той же точке пространства. Магнитная сила  $\overline{F_m}$  определяется размерами зерна, интенсивностью магнитного поля и его неоднородностью в рассматриваемой точке пространства.  $\overline{F_{M1}} \approx (7 \div 15) \cdot 10^{-4}$  Н – сила магнитного происхождения, возникающая в результате поворота зерен при

МАО, вызванная стремлением зерен ориентироваться вдоль силовых линий магнитного поля.  $\overline{F_{эм}} \approx 10^{-7}$  Н – силы взаимодействия индукционных токов индуцируемых в элементарных контурах, сформированных группами движущихся в рабочих зонах частичек МАП при их взаимодействии;  $\overline{F_{ин}} \approx 10^{-5}$  Н – инерционные силы, которые зависят от массы частиц и их способности к группированию;  $\overline{F_{цб}} \approx 10^{-6}$  Н – центробежные силы.

Одновременное действие указанной группы сил приводит к возникновению давления на обрабатываемую поверхность порядка  $0,3 \div 2$  МПа, а каждое зерно или группа зерен давит на поверхность с силой  $0,025 \div 0,12$  Н. Реальная эпюра давлений при обработке цилиндрических деталей в кольцевой рабочей зоне приведена на рис. 4.59, а характер изменения давления порошка на обрабатываемую поверхность в зависимости от размеров зерен ферроабразивного порошка на рис. 4.60. Показано, что максимальное давление характерно для порошков со средним размером частиц  $250 \div 500$  мкм. Снижение давления при использовании МАП с частицами, отличающимися от указанного диапазона объясняется тем, что имеет место снижение числа зерен, контактирующих с единицей площади обрабатываемой поверхности.

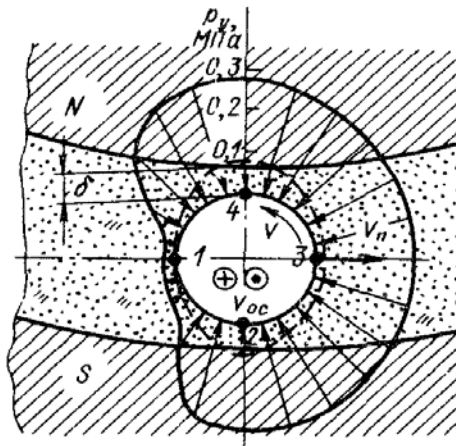


Рисунок 4.59 – Эпюра давлений МАП на поверхность цилиндрических деталей при МАО в кольцевой рабочей зоне [25]

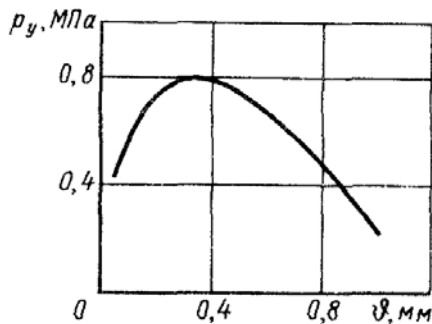


Рисунок 4.60 – Изменение давления порошка на обрабатываемую поверхность в зависимости от размеров зерен ферроабразивного порошка [25]

#### **4.5.8. Магнитно-абразивная обработка деталей сложной пространственной конфигурации**

Эффективность магнитно-абразивной обработки (МАО) в значительной мере определяется соотношением двух технологических факторов, которые взаимосвязаны: - величиной давления порошкового магнитно-абразивного инструмента (МАИ) на поверхность обрабатываемых деталей, которая существенно зависит от величины магнитной индукции в рабочих зазорах станков, их конструкции, динамики процесса обработки;

- скоростью относительного перемещения частиц порошкового МАИ и обрабатываемой поверхности.

При этом в процессе МАО с целью обеспечения равномерной и производительной обработки указанные факторы для любого участка обрабатываемой поверхности каждой конкретной детали должны обеспечивать близкую по величине эффективность.

Увеличение сил магнитного поля в рабочих зонах магнитных щелей обеспечивает формирование МАИ повышенной жесткости, которая приводит к росту давления со стороны отдельных объемов МАИ на поверхность деталей. Однако, при этом снижается возможность инструмента нивелировать относительно обрабатываемой поверхности, то есть осуществлять равномерное силовое воздействие на каждый элементарный участок детали, особенно в случаях деталей сложной пространственной конфигурации.

Увеличение скорости перемещения деталей относительно магнитно-абразивного порошка, фиксированного магнитным полем, обеспечивает рост динамической составляющей со стороны МАИ на обрабатываемую поверхность. Это, в свою очередь, приводит к активному переформированию МАИ и образованию в нем специфических уплотненных зон. Максимальная фиксация МАИ в рабочих зазорах реализуется при обработке деталей простой формы - тела вращения, плоскости, когда возможно использование магнитных зазоров малой ширины, создавая в них достаточно "большие" магнитные поля – до 1-1,2 Тл. Обработка деталей сложной конфигурации, представителями которых являются лопатки газотурбинных двигателей (ГТД), режущий инструмент, детали спецарматуры, как правило, реализуется в условиях магнитных зазоров большой ширины. Реализация эффективного процесса МАО деталей сложной пространственной конфигурации во многом определяется кинематикой и динамикой процесса обработки – обеспечением сложной траектории перемещения обрабатываемых деталей в зонах обработки, соответствующими скоростями обработки, использованием порошковых материалов со специальными свойствами. При этом наиболее приемлемой схемой обработки, позволяющей избежать нежелательных явлений, связанных с выносом и разбрасыванием порошковой массы, создать оптимальные условия для «обтекания» МАИ обрабатываемых поверхностей

является схема типа «кольцевая ванна». Для такой схемы MAO, при использовании магнитных зазоров значительной ширины наиболее существенным факторами, определяющими эффективность процесса, являются скорость относительного перемещения обрабатываемой детали и МАИ, условия базирования и траектория движения деталей в зонах обработки. Магнитное поле при этом удерживает и формирует порошковый МАИ в рабочем состоянии в зонах обработки. Для этой цели достаточным является использование относительно слабых магнитных полей – до 0,3-0,4 Тл.

#### **4.5.9. MAO концевго режущего инструмента**

Работоспособность режущего инструмента зависит от целого ряда факторов, которые условно можно разделить на три группы.

##### *1. Факторы, активизирующие износ:*

- физико-механические свойства обрабатываемого материала;
- режимы резания и как следствие возникающие нормальные и тангенциальные напряжения на контактных площадках инструмента;
- температура резания;
- наличие агрессивных сред в зоне резания.

##### *2. Факторы, определяющие способность режущего инструмента сопротивляться износу:*

- физико-механические свойства инструментального материала;
- конструкция инструмента и геометрия заточки;
- шероховатость контактных площадок;
- исходное состояние и форма режущих кромок;
- факторы наследственности, которые определяются технологией изготовления, характером проведения заточки, термической обработкой, наличием на поверхности защитных покрытий и т.п.

##### *3. Факторы, сопутствующие резанию и оказывающие влияние на стойкость инструмента:*

- состав, свойства и способ подвода в зону резания СОТС;
- жесткость технологической системы;
- характер образующейся стружки и способов ее отвода от зоны резания.

Процесс MAO режущего инструмента позволяет прямо и косвенно воздействовать на все группы факторов. Так, снижение шероховатости на контактных поверхностях режущего инструмента способствует уменьшению сил трения на этих поверхностях, усадки стружки, работы на пластическую деформацию стружки. Все это способствует снижению сил резания, меньшему тепловыделению и созданию благоприятных условий для эксплуатации режущего инструмента. Для таких концевых инструментов как сверла, пальчиковые фрезы низкая шероховатость стружечных канавок способствует лучшему отводу стружки из зон резания, предотвращается ее пакетирование и, как следствие, поломка инструмента.

В результате MAO одновременно со снижением шероховатости происходит рациональное формирование радиусов округления режущих кромок с одновременным полным удалением заусенец, образующихся при заточке, удаление исходного дефектного слоя и упрочнение поверхностного слоя, которое связано с формированием в нем остаточных сжимающих напряжений, повышению поверхностной твердости, увеличению и измельчению карбидных фаз, отсутствию остаточного аустенита. Характерные изменения шероховатости рабочих поверхностей и округления режущих кромок представлены в таблице 4.2, а поверхностной твердости и остаточных напряжений на быстрорежущем инструменте после MAO приведены на рис. 4.61 и 4.62 соответственно [46].

Таблица 4.2 – Шероховатость рабочих поверхностей и величины радиуса округления режущих кромок сверл

Условия обработки	Шероховатость Ra, мкм				Радиус округления режущей кромки, мкм
	Передняя поверхность	Задняя поверхность	Винтовая ленточка сверла	Режущая кромка	
Без MAO	1,3	0,8	0,42	3,47	6,45
MAO порошком Ферромап 160/63 мкм	0,750	0,82	0,28	2	4,6
MAO порошком ПР Р6М5 315/200 мкм	1,03	0,78	0,42	2,4	6,5
MAO в 2 этапа 1 этап порошком Ферромап 2 этап порошком ПР Р6М5	0,48	0,76	0,35	2,02	5,4

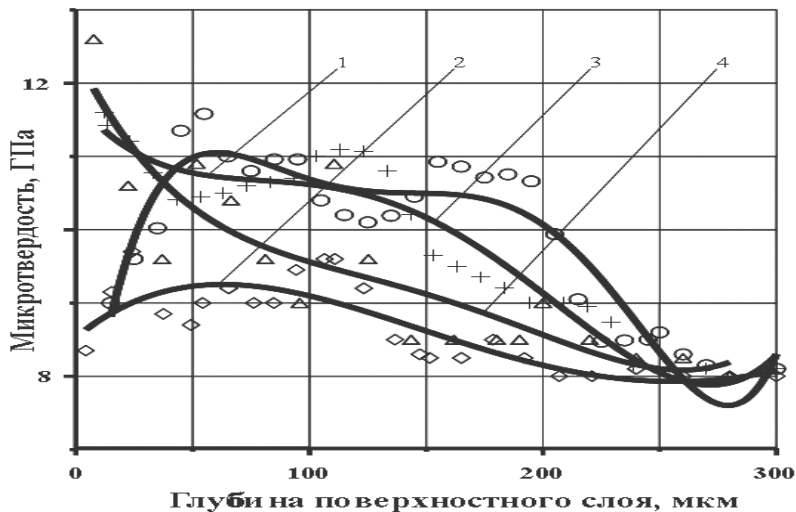


Рисунок 4.61 – Влияние размера частиц МАП на глубину и твердость упрочненного поверхностного слоя при МАО 80 с, магнитной индукции 0,21 Тл, размере частиц 200/100 мкм и скорости МАО: кривая 1 – 3,5 м/с, 3 – 5 м/с; 630/400 мкм: 2 – 3,5 м/с, 4 – 5,0 м/с

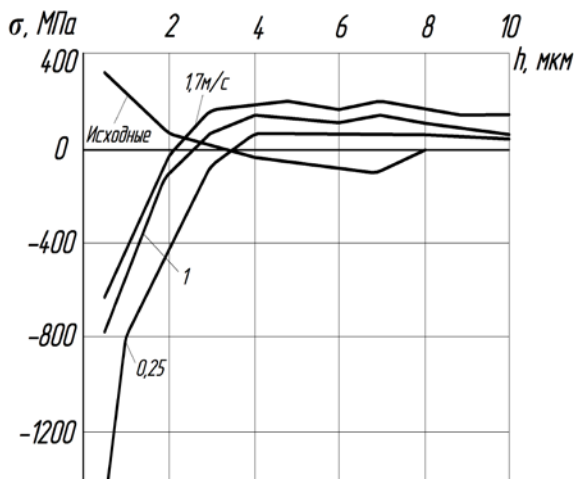


Рисунок 4.62 – Изменение остаточных напряжений в поверхностном слое сверл после МАО с различными скоростями обработки

Исследования работоспособности концевго режущего инструмента на примере сверл  $\text{Ø}6,8$  мм, изготовленных из быстрорежущей стали, выполненные при сквозном сверлении плиты толщиной 30 мм из стали 45 при частоте вращения 1000об/мин. и подаче 0,1мм/об различными магнитно-абразивными порошками приведены на рис. 4.63.

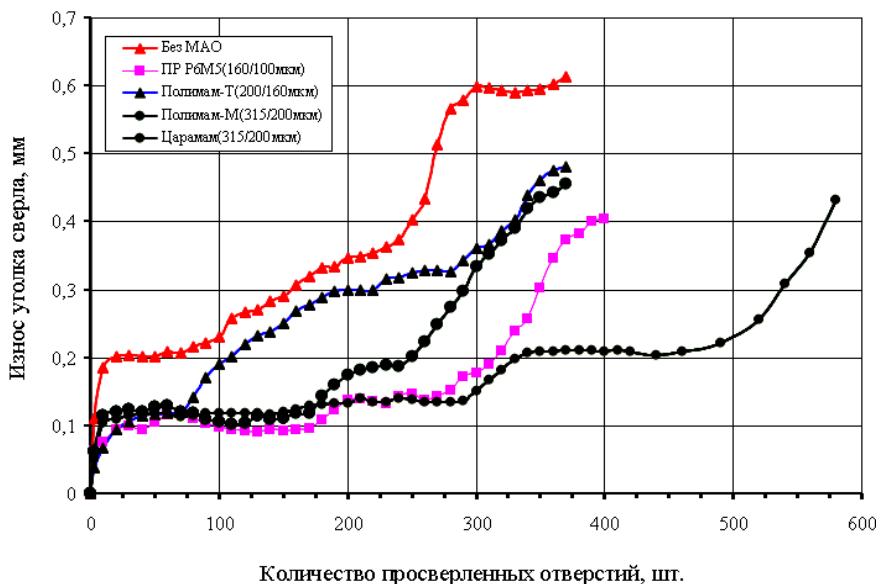


Рисунок 4.63 – Величина износа уголка сверл после МАО различными порошками в зависимости от количества просверленных отверстий

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что МАО обеспечивает повышение стойкости режущих инструментов, изготовленных из быстрорежущих сталей, в 2 и более раз. Аналогичные результаты получены и при обработке метчиков из быстрорежущих сталей, сменных твердосплавных неперетачиваемых многогранных пластин, концевых твердосплавных фрез и др. инструментов.

#### 4.5.10. Обеспечение качества рабочих лопаток ГТД магнитно-абразивным методом

Одной из наиболее ответственных операций при изготовлении лопаток газотурбинных двигателей является формирование кромок пера. Традиционные способы, связанные с использованием на финишных операциях большого количества ручного труда высокой квалификации и тем

самым приводящие к удорожанию продукции и нестабильному ее качеству. Особенно сложной является эта задача, для малогабаритных лопаток, радиус кромок которых составляет менее 0,1 мм. Наиболее перспективным для осуществления данной технологической операции является метод MAO в больших зазорах вследствие особых свойств МАИ и специфических особенностей его взаимодействия с обрабатываемой поверхностью [46-47].

Исследования процесса формирования кромок лопаток ГТД, выполненные на установке с рабочей зоной типа кольцевой ванны (рис. 4.64) показали, что при использовании магнитно-абразивного порошка Полимам-Т, с размером частиц 160/100 мкм на лопатках из сплава ЭП-718 с высотой пера 28 мм, длиной хорды 22 мм и величиной прогиба пера 3мм при скорости MAO 4,5 м/с; магнитной индукции в рабочих зазорах, заполненных магнитно-абразивным порошком 0,55 Тл; углах фиксированного разворота лопатки  $\alpha$ :  $-15^\circ$ ,  $-10^\circ$ ,  $-5^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $10^\circ$  и  $15^\circ$  получены результаты, приведенные на рис. 4.64.

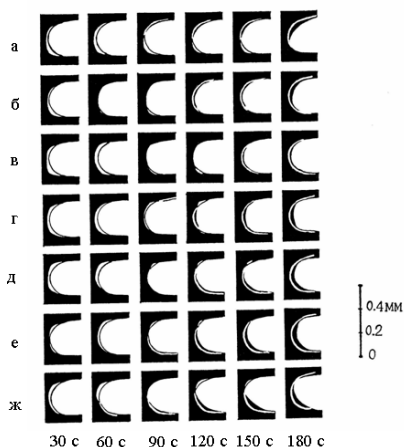


Рисунок 4.64 – Изменение формы обрабатываемой кромки от времени обработки и угла базирования лопатки:  
а)  $-15^\circ$ ; б)  $-10^\circ$ ; в)  $-5^\circ$ ; г)  $0^\circ$ ; д)  $5^\circ$ ;  
е)  $10^\circ$ ; ж)  $15^\circ$

Производительность процесса по формированию величины радиуса округления кромок до заданной величины приведена в таблице 4.3.

При движении лопатки в рабочем зазоре, заполненном магнитно абразивным порошком, процесс обработки определяется несколькими совместно протекающими процессами, а именно формированием и разрушением веерообразных уплотнений, которые обрабатываемая деталь формирует и перемещает перед своей передней кромкой, уплотнением порошкового МАИ в зонах выхода из зазоров, а эти процессы в свою очередь зависят от характера магнитных и реологических взаимодействий в системе.

Таблица 4.3 – Величина радиуса качественно округленной кромки от времени обработки и угла базирования лопатки

Угол базирования $\alpha$	Время обработки, с			
	30	60	90	120
-15	0,10	0,12	0,15	0,22*
-10	0,10	0,12	0,13	0,22*
-5	0,10	0,13	0,14	0,17*
0	-	0,10	0,12	0,15*
5	-	0,11	0,12	0,15*
10	0,10	0,11	0,13	0,19*
15	0,10	0,12	0,14	0,21*

*Примечание:* \* величина радиуса округления лопаток согласно данным чертежа.

Если деталь движется с малой скоростью, то вместе с ней, перед ее передней кромкой перемещается порция порошка в виде квазистабильного веерообразного уплотнения, которое имеет очень малую скорость относительно детали и предотвращает контакт детали с другими порциями МАИ. Обработка в таких случаях или вообще не происходит, или происходит очень медленно. При превышении деталью предельного значения скорости происходит срыв веерообразного уплотнения с передней кромки и происходит активный контакт поверхности детали, в особенности в области кромки лопатки, с основной массой МАИ. Именно в таком случае происходит активная обработка. Изменение угла  $\alpha$  в первой серии опытов практически означало изменение условий срыва веерообразных уплотнений.

Фактически для значительных отклонений  $\alpha$  от  $0^\circ$  срыв происходил только с одной стороны лопатки, вторая же сторона оставалась надежно прикрытой. Потому округление кромки происходило только с одной стороны лопатки. На рис. 4.65 показана схема образования и разрушения веерообразных уплотнений при разных значениях угла  $\alpha$ .

Участки повышенной плотности при МАО лопаток, кроме случая (рис. 4.65 б), остаются практически неподвижными относительно поверхности лопатки. При значениях  $\alpha$  близких к  $0^\circ$  срыв веерообразных уплотнений происходит по обе стороны пера, вследствие чего обработка носит равномерный характер. С другой стороны пребывания кромки пера лопатки под постоянным давлением новых порций порошка, что и наблюдается при закритических скоростях, приводит к активному диспергированию материала с поверхности пера лопатки в области кромки. С увеличением времени обработки округление происходит одновременно с уменьшением толщины пера лопатки.

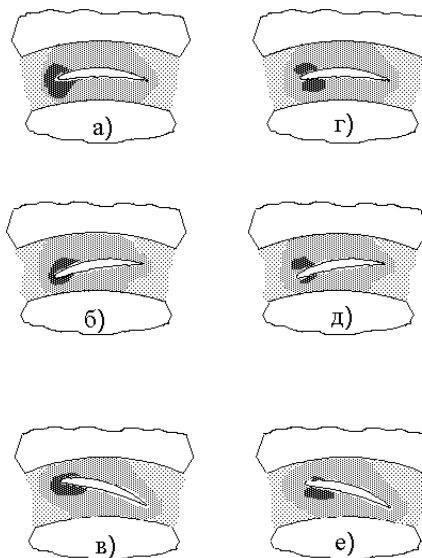


Рисунок 4.65 – Схема образования зон повышенной плотности МАИ при образовании (а-в) и разрушении (г-е) веерообразных уплотнений при значениях угла  $\alpha$  базирования лопатки в рабочей зоне:  $\alpha=0^\circ$  - а, г;  $\alpha=10^\circ$  - б, д;  $\alpha=-10^\circ$  - в, е

Таким способом при обработке кромок лопаток в условиях кольцевой ванны при отсутствии колебаний лопатки вокруг собственной вертикальной оси происходит округление кромки пера, однако не обеспечивается необходимая производительность и соответствующее высокое качество округления. Рост скорости МАО приводит к уменьшению размера хорды, а уменьшение скорости - к затуханию и прекращению процесса. Обработка при малых отклонениях угла  $\alpha$  от нуля приводит к уменьшению толщины кромки, при больших отклонениях к односторонней обработке и утолщению кромки за счет уменьшения величины хорды.

Для устранения указанных технологических недостатков целесообразно осуществлять колебания лопатки вокруг своей вертикальной оси. При амплитуде угла колебания лопатки  $\theta = 5^\circ, 9^\circ$  и  $14^\circ$ , что происходит активизация обработки кромок в целом тем сильнее, чем больше амплитуда колебания, а производительность возрастает в 1.8-2 раза.

#### 4.5.11. Влияние магнитно-абразивной обработки на состояние поверхности и физико-механические характеристики поверхностного слоя лопаток ГТД

Возможность получения высоких классов шероховатости поверхности ( $Ra < 0,2$  мкм) со значительной производительностью без изменения геометрии деталей делает метод МАО достаточно привлекательным при использовании его на финишных операциях изготовления, таких ответственных и сложных деталей, как лопатки компрессоров газотурбинных двигателей [48]. Выполненные предыдущие исследования [25,47,49,50]

показали перспективность использования технологии MAO, как полирующе-упрочняющей операции. Необходимо отметить, что обработка деталей на магнитно-абразивном станке с кольцевым расположением магнитных зазоров значительной величины в слабых магнитных полях позволяет совмещать в себе преимущества двух методов обработки - непосредственно MAO и струйных методов, которые обеспечивают эффективное упрочнение поверхностного слоя обрабатываемых деталей. Однако известные результаты не позволяют в достаточной степени определить особенности влияния данного вида обработки на состояние физико-механических характеристик поверхностного слоя лопаток ГТД, пути целенаправленного их изменения и при этом конкретно установить технологические аспекты метода MAO для промышленного использования на финишных операциях изготовления и ремонта лопаток компрессоров ГТД.

#### **4.5.12. Влияние MAO на формирование технологических остаточных напряжений в поверхностном слое лопаток ГТД**

Влияние режимов MAO при обработке в условиях кольцевого расположения магнитных зазоров [42] на характер распределения остаточных напряжений в поверхностном слое деталей исследовали на лопатках компрессоров с высотой пера 36 мм, хордой 24мм и  $C_{\max}=1,4-3,1$  мм, изготовленных из сплава ЭП718ВД (ХН45МВТЮБР), с исходной шероховатостью поверхности Ra 0,3 мкм, которые прошли предыдущую термическую обработку - двойное старение в вакууме с целью стабилизации микроструктуры лопаток и внутренних напряжений, которые получены на предыдущих этапах изготовления деталей.

Обработку выполняли порошком СП-17 (ТУ 24.08-708-73) с размером частиц 500/200 мкм, который имеет высокую абразивную способность и позволяет проводить MAO в достаточно жестких условиях. Особенность использования в качестве магнитно-абразивного материала порошка СП-17 определяется тем фактом, что он позволяет получать конечную шероховатость поверхности после MAO в достаточно широких границах, - от Ra 0,3 мкм до 1 мкм в зависимости от режимов обработки. Время обработки деталей составляло 2 мин. с реверсом вращения (на входную кромку лопаток - 70 с, на выходную - 50 с) при плавном введении деталей в зону обработки, которая сформирована полюсными наконечниками высотой 20 мм.

Установлено [25,48], что эффективность процесса MAO прежде всего определяется жесткостью МАИ, сформированного магнитным полем в рабочих зазорах в процессе обработки. А именно индукцией магнитного поля в рабочем пространстве магнитных зазоров и скоростью главного рабочего движения при MAO. В нашем случае – это скорость вращения вокруг оси кольцевой ванны. Изменение остаточных напряжений, их величина и характер распределения по глубине поверхностного слоя пера лопаток определяли по методу Н. Давиденкова – при послойном удалении материала с

поверхности [29] образцов в виде прямоугольных полосок, вырезанных вдоль вертикальной оси лопатки возле входной, выходной кромок деталей на расстоянии 1 мм от кромки и в центре пера.

Был исследован диапазон скоростей МАО  $V=1,7-6$  м/с, и диапазон магнитных индукций в рабочих зазорах –  $B=0,1-0,6$  Тл. Результаты изменения шероховатости поверхности и остаточных напряжений в поверхностном слое пера лопаток после МАО приведены в таблице 4.4.

Установлено, что эпюры остаточных напряжений в поверхностном слое имеют идентичный характер, а их характерный вид после МАО лопаток при разных индукция магнитного поля в зонах обработки приведено на рис. 4.66.

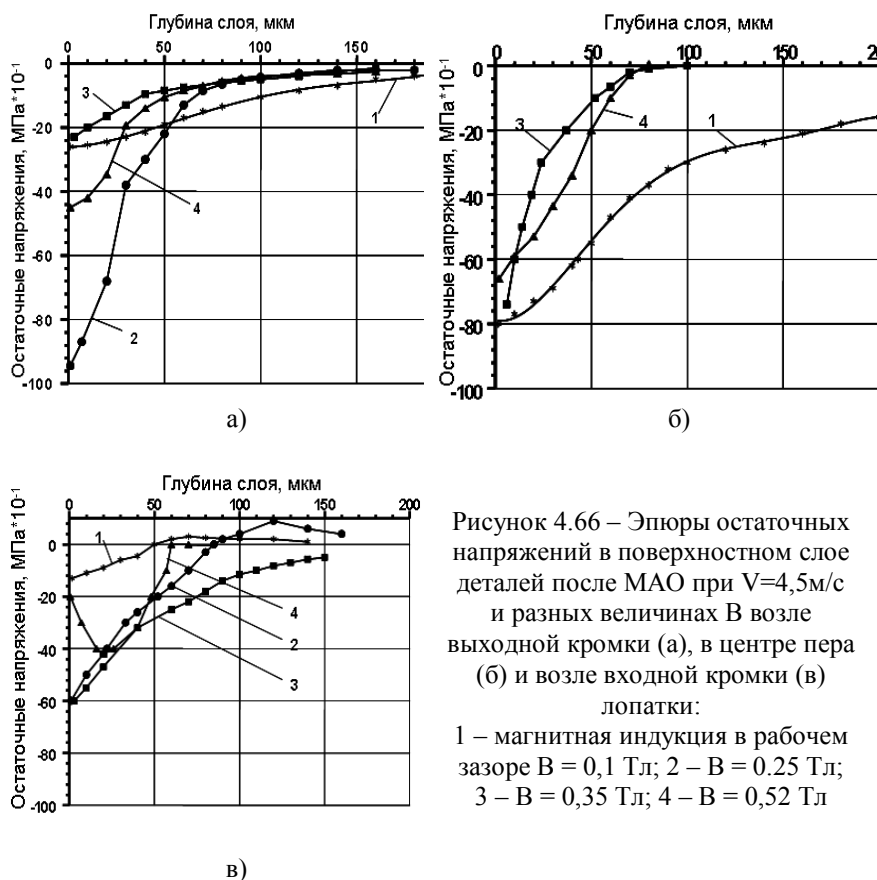


Рисунок 4.66 – Эпюры остаточных напряжений в поверхностном слое деталей после МАО при  $V=4,5$  м/с и разных величинах  $B$  возле выходной кромки (а), в центре пера (б) и возле входной кромки (в) лопатки:  
 1 – магнитная индукция в рабочем зазоре  $B = 0,1$  Тл; 2 –  $B = 0,25$  Тл; 3 –  $B = 0,35$  Тл; 4 –  $B = 0,52$  Тл

Таблица 4.4 – Изменение шероховатости поверхности и остаточных напряжений в поверхностном слое пера лопаток после MAO порошком Полимам-Т

Скорость MAO, м/с	Магнитная индукция в рабочих зазорах, Тл	Время MAO, мин.	Размер частиц МАИ, мкм	Шероховатость поверхности Ra, мкм		Остаточные напряжения (входная кромка) (центр лопатки) (выходная кромка)		
				Корыто	Спинка	Величина, МПа*10 <sup>-1</sup>	Глубина, мкм	Особенности
4	0.4	5	315/200	0.32		до 30 до 30 до 60	до 30 до 30 до 150	
4.55	0.2	3.5	400/315	0.34-0.78		до 20 до 40 10-15	до 200 до 200 и > до 100 и >	
4.55	0.1	5.8	400/315	0.35-0.84		до 5 35-40 до 10	до 100 до 200 и > до 100 и >	
4.55	0.3	3.3	400/315	0.23-0.33	0.26-0.5	20-50 20-40 40-55	до 100 до 120 до 100	
4.55	0.2	5.15	400/315	0.24-0.28	0.23-0.24	25-35 20-30 до 40	до 120 до 200 до 100 и >	
6	0.2	3.5	400/315	0.27-0.3	0.23-0.25	30-50 20-30 20-30	до 100 и > до 200 и > до 100	
4.55	0.4	3.5	315/200	0.095-0.16	0.095-0.2	15-45 20-30 до 15	до 100 до 150 до 100	
4.55	0.2	5.15	315/200	0.12-0.17	0.129-0.17	20-40 30-50 20-40	до 150 110 150	подслои . max 520МПа на 35 мкм

4.55	0.2	3.3	400/315	0.25-0.38	20-40 40-50 20-40	до 200 и >	подслои . max 600МПа на 50 мкм
4.55	0.2	4.85	400/315	0.24-0.42	30-40 20-30 30-50	до 100 и > до 120 до 100 и >	подслои . max 650МПа на 50 мкм
3	0.7	3.5	400/315	0.1- 0.25	55-75	до 100 и >	

Показано, что уменьшение частоты вращения деталей вокруг оси кольцевой рабочей зоны, то есть скорости основного рабочего движения лопаток с 4,55 м/с до 1,7 м/с при магнитной индукции в рабочих зазорах 0,35 - 0,4 Тл не приводит к уменьшению глубины залегания остаточных напряжений в поверхностном слое пера лопаток. При этом имеет место снижение величины напряжений, что связано с уменьшением работы, на пластичную деформацию поверхностного слоя в результате уменьшения пути, в течение которого происходит активное воздействие МАИ на деталь при неизменном времени MAO для разных значений V [49].

Увеличение скорости MAO до 6 м/с приводит к уменьшению величины и глубины залегания напряжений до -400 МПа и 80 мкм, соответственно. Это объясняется тем, что процесс упрочнения (наклепа) поверхности, связанный с пластической деформацией поверхностных слоев детали проходит менее интенсивно, чем диспергирование материала с поверхности лопаток. То есть энергии от ударного взаимодействия элементов МАИ с поверхностью лопаток не достаточно для формирования глубинных остаточных напряжений. Кроме того, в процессе MAO выполняется активное диспергирование поверхностного слоя. Подобные явления имеют место как при скоростях MAO -  $V=2,2 - 2,8$  м/с, так и при  $V=4,5 - 5$  м/с. С увеличением магнитной индукции от 0,1 до 0,6 Тл наблюдается повышение величины отрицательных напряжений в поверхностном слое пера лопаток, особенно в центре детали, и снижение глубины их залегания (менее 100 мкм).

Это объясняется тем, что увеличение величины **V** приводит к росту жесткости МАИ, т.е. к возрастанию сил давления со стороны элементов МАИ на поверхность деталей, и как результат, проявляется повышение величины сил резания и интенсивности пластической деформации поверхностного слоя. Наибольшие напряжения имеют место в центре пера лопатки, что связано с большим временем процесса активной MAO этой части лопаток. Подтверждение этого факта получено при анализе изменения средней шероховатости поверхности в процессе MAO в зависимости от **V** и **V**

(рис. 4.67). Увеличение величины  $B$  от 0,2 до 0,5 Тл приводит к активизации диспергирования материала с лопаток, и как результат к ухудшению шероховатости поверхности, в то время как при  $B=0,1 - 0,2$  Тл имеет место формирование минимальной шероховатости для данного типа применяемого магнитного абразива [37].

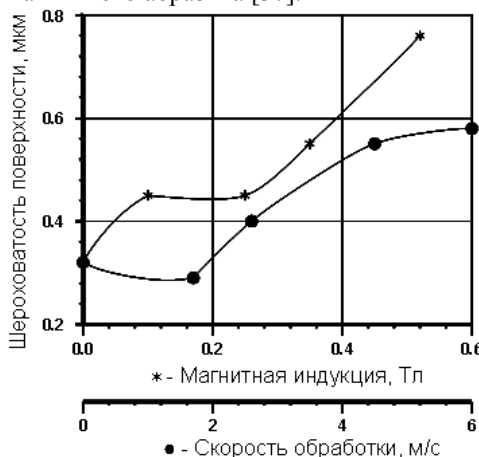


Рисунок 4.67 – Изменение шероховатости поверхности пера лопатки после МАО от магнитной индукции в рабочих зазорах при  $V=4,5$  м/с и скорости обработки при  $B=0,35$  Тл

Повышение величины  $R_a$  связано с тем, что увеличение магнитной индукции приводит к росту жесткости МАИ, т.е. растет сила давления со стороны инструмента на поверхность деталей, и как результат повышается глубина обработки.

Идентичные результаты получены и при росте скорости МАО. Это связано с силами взаимодействия между МАИ и поверхностью деталей, а также особенностями перемешивания порошка в рабочих зонах во время МАО, то есть динамикой процесса [46,49].

#### 4.5.13. Влияние наследственности обработки на состояние поверхности и физико-механические свойства поверхностного слоя лопаток

Рациональное использование МАО, как упрочняюще-полирующей операции в технологическом процессе изготовления лопаток невозможно без информации о состоянии поверхности, поверхностного слоя деталей и их эксплуатационных характеристиках. Существующие технологические цепочки изготовления лопаток на заключительных стадиях обработки состоят из:

- 1) слесарной обработки, которая включает в себя полирование прикомлевой зоны (R-перехода) и входных кромок;
- 2) заключительного полирования пера на ленточных виброполировальных (ЛВП) станках и ручной доводки кромок;

- 3) термической обработки (двойное старение);
- 4) поверхностного упрочнения пера лопаток путем обдувки микрошариками;
- 5) виброшлифование лопатки.

Анализовалась возможность замены процесса обработки на станках ЛВП методом MAO. MAO выполняли порошком Полимам-Т с размером частиц 250/160 мкм, в течение 120с с реверсом (60 с на входную кромку и 60 с на исходную), при скорости вращения вокруг оси кольцевой ванны 4,5 м/с и магнитной индукции в рабочих зонах магнитных зазоров 0,4 Тл. После MAO получена общая шероховатость поверхности с  $Ra=0,2-0,3$  мкм при отдельных отклонениях от действующих образцов в виде черточек и вмятин длиной 15 мм и глубиной меньше 0,008 мм (рис. 4.68, рис. 4.69), которые являются следствием операции вальцевания.

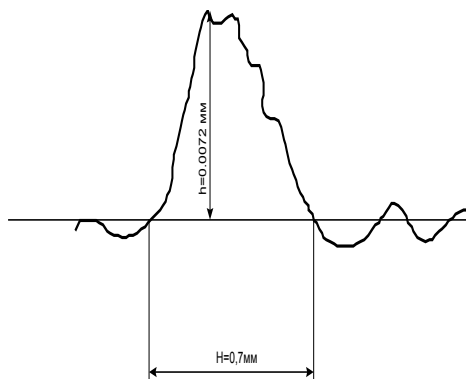


Рисунок 4.68 –  
Профилограмма характерного  
дефекта на поверхности  
лопатки после операции  
вальцевания и последующей  
MAO

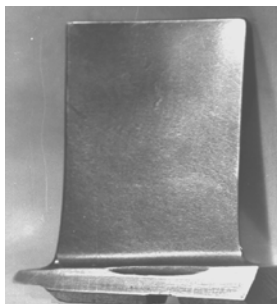


Рисунок 4.69 – Внешний вид лопаток после магнитно абразивной обработки

Последующие технологические операции изготовления лопаток были сохранены. После каждой технологической операции изготовления лопаток контролировали качество деталей по шероховатости поверхности, величине и глубине залегания остаточных напряжений. Результаты контроля приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Результаты контроля качества деталей после разных технологических операций обработки

Вид обработки	Шероховатость поверхности Ra, мкм	Остаточные напряжения	
		величина, МПа	глубина залегания, мкм
Ручное полирование	0,32-0,63 (корыто) - 0,63 (спинка)	+300 ÷ -500	до 200
После MAO	0,32	+150 ÷ -300	до 200
После упрочнения микрошариками	0,89-0,97	-(500 ÷ 920)	до 160
После виброшлифования	0,204-0,28	-(500 ÷ 850)	более 100

В результате исследований остаточных напряжений в поверхностном слое пера лопаток, изготовленных с использованием MAO, перед технологической операцией упрочнения микрошариками установлен существенный их разброс по величине от +100 МПа до -500 МПа при глубине залегания от 40 мкм до 200 мкм. Такое различие в величине напряжений от сжимающих к растягивающим является следствием ручного полирования. Операция термической обработки, которая используется в существующем технологическом процессе (двойное старение) выполняется для стабилизации механических и структурных характеристик материала лопаток.

Установлено, что двойное старение не приводит к полному удалению остаточных напряжений в поверхностном слое - растягивающие напряжения устраняются полностью, а сжимающие уменьшаются до 100-400 МПа при глубине их залегания 80-120 мкм. Это связано со специфическими особенностями подобной термической обработки, направленной на стабилизацию структуры материала (выделение в материале лопаток упрочняющей  $\gamma'$  фазы).

Лопатки, которые прошли обработку магнитно-абразивным методом, и лопатки, которые после MAO дополнительно упрочнялись микрошариками и

подвергались виброшлифованию, при испытаниях на сопротивление усталости показали предел выносливости  $\sigma_{-1}=600$  МПа, а с последующей обработкой по существующей технологической цепочке -  $\sigma_{-1}=660$  МПа, что для первого случая отвечает минимальному пределу, а для второго - выше предела выносливости серийных лопаток (600-620 МПа).

#### 4.5.14. Реализация интегрированного процесса магнитно-абразивного полирования в потоке газовой среды внутренних поверхностей полимерных оптических изделий

При реализации интегрированного процесса магнитно-абразивного полирования внутренних поверхностей изделий “Tile” оптических полимеров на основе полистирола (рис. 4.70) в газовой среде наблюдаются следующие особенности.

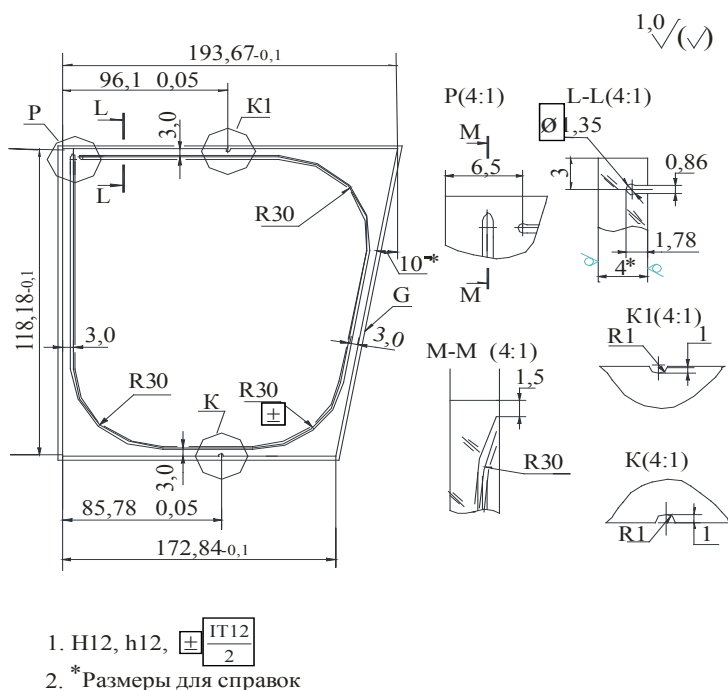


Рисунок 4.70 – Эскиз полимерного изделия типа “Tile”

1. Сечения канавки имеют небольшие геометрические размеры и сложный контур (сечение L-L – типа « замочная скважина» с внутренним сечением диаметра 1.35 мм под оптический световод );

2. Невозможность использования жидких сред для достижения наилучшего эффекта магнитно-абразивной обработки из-за угрозы появления трещин в поверхностном слое полимеров;

3. Сложность реализации традиционного процесса магнитно-абразивной обработки из-за необходимости создания высокой концентрации абразивного порошка для обеспечения процесса полирования по всему внутреннему контуру канавки.

4. Невозможность охватить магнитным полем весь контур канавки крупногабаритной детали.

Основные подходы к разработке технологического процесса и создания опытной экспериментальной установки для его реализации кроме вышеуказанных особенностей должны учитывать ряд факторов (рис. 4.71), связанных с условиями основного и осциллирующего перемещения абразивных частиц с заданной скоростью и под заданным углом контакта, а также условиями контакта абразивного порошка с полимерным материалом в достаточно стесненном пространстве.



Рисунок 4.71 – Методология интегрированного процесса магнитно-абразивного полирования в газовой среде

#### 4.5.15. Конструкция полировальной головки для реализации интегрированного процесса магнитно-абразивного полирования внутренних поверхностей в газовой среде

Для реализации процесса магнитно-абразивного полирования внутренних поверхностей канавки под световод в изделии “Tile” предложена конструкция полировальной головки (рис. 4.72). Полировальная головка состоит из корпуса 4, датчиков 21 и 22, направляющих 7, электромагнитов 3, скользящей площадки и емкости для абразива 8. Крепление головки осуществляется непосредственно на шпинделе базового координатного сверлильно-фрезерно-расточного станка модели 24К4ОСФ4 с системой ЧПУ с помощью 4 крепежных отверстий, находящихся на щеках направляющих 6, через переходной кронштейн 2.

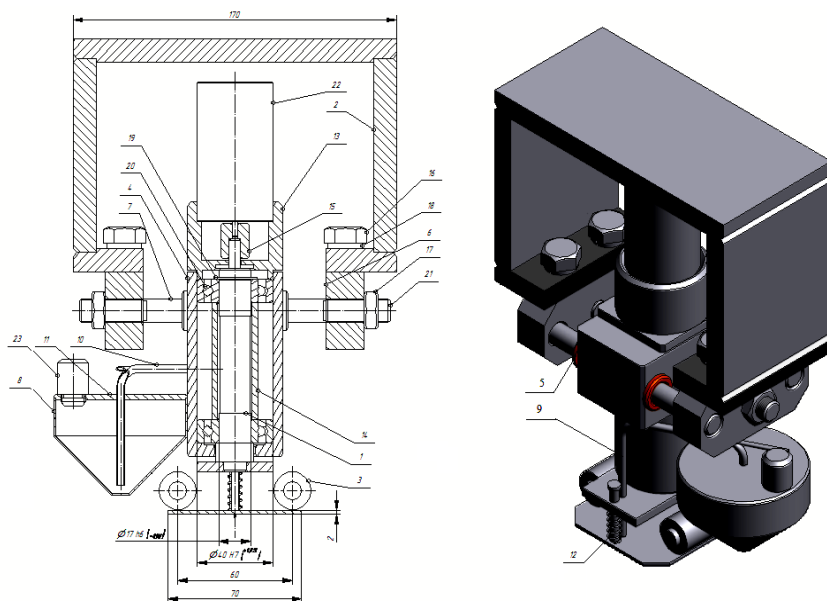


Рисунок 4.72 – Конструкция полировальной головки в сборе

Принцип действия полировальной головки заключается в следующем. Магнитно-абразивный порошок засыпается в емкость 8. С помощью трубки 10, в которой посредством инъекции сжатого воздуха создается разрежение, порошок подается в обрабатываемую канавку изделия “Tile”. Обрабатываемая канавка с двух сторон ограничена штырьками площадки, создающими сопротивление для прохождения воздуха. На противоположной

стороне площадки размещена вторая трубка, которая засасывает магнитно-абразивный порошок, попавший в канавку изделия “Tile”. Так как канавка ограничена штырьками площадки, основной поток воздуха идет между двумя трубками. Скорость этого потока регулируется с помощью изменения давления сжатого воздуха. Магнитно-абразивные частицы находятся во взвешенном состоянии и отклоняются от траектории, определяемой воздушным потоком, только под воздействием электромагнитного поля придавая траектории движения абразивных частиц осциллирующее движение, позволяя полировать весь мелкогабаритный (диаметр 1.35 мм) контур изделия (рис. 4.73).

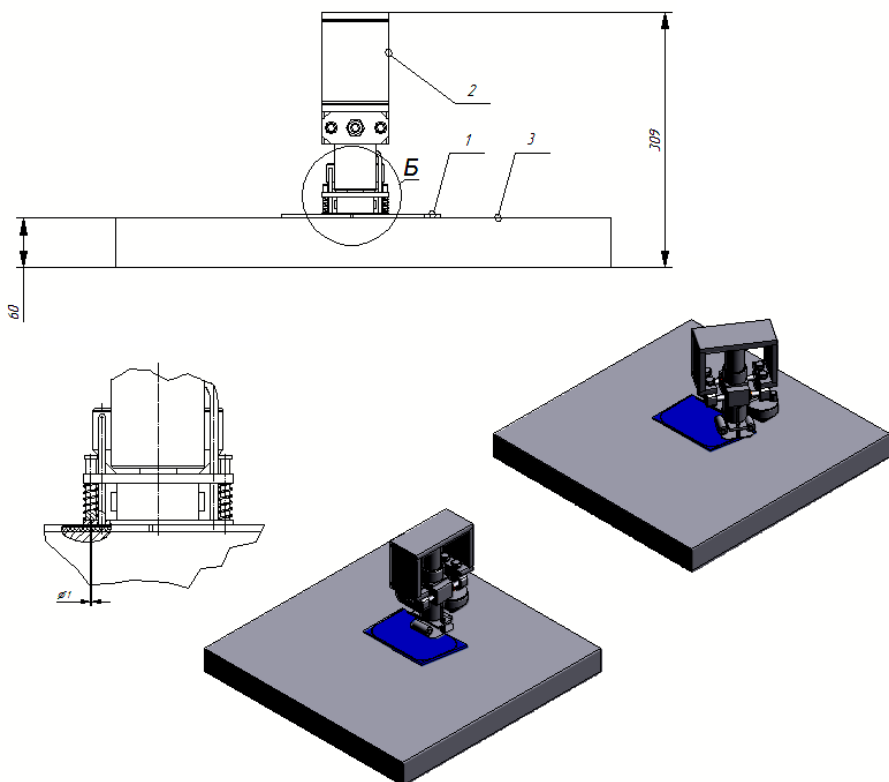


Рисунок 4.73 – Схема полирования канавки изделия “Tile”

После попадания в отсасывающую трубку частицы снова поступают в емкость для порошка, но в верхнюю его часть по касательной к стенке. В данном случае емкость работает как циклон, резко снижая скорость воздушного потока, что вызывает падение частиц порошка на дно. Излишки воздуха выходятся через фильтр, вмонтированный в крышку емкости.

Процесс течения газа по вакуумной трубке 10 связан преобразованием энергии в движущемся потоке газа. Для выбора рациональных условий работы полировальной головки определим скорость истечения и секундный расход газа. Считаем, что течение газового потока в процессе работы головки установившееся. При адиабатном установившемся течении газа увеличение кинетической энергии происходит за счет уменьшения его энтальпии, а, следовательно, и внутренней энергии. Увеличение скорости газа происходит при уменьшении его давления и температуры, а, следовательно, и при уменьшении местной скорости звука. Теоретически расход газа  $M_T$  через вакуумную трубку определим согласно выражению:

$$M_T = f \sqrt{2 \frac{k}{k-1} \frac{p_1}{v_1} \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}, \quad (4.5)$$

$$f = \frac{\pi d^2}{4}, \quad (4.6)$$

где  $f$  – площадь выходного сечения с вакуумной трубки, м<sup>2</sup>;  $d = 0,003$  м – диаметр вакуумной трубки, м;  $k = 1,4$  – показатель адиабаты для вытекающего газа (в нашем случае для воздуха);  $v_1$  – удельный объем газа на входе в вакуумную трубку, м<sup>3</sup>/кг;  $p_1, p_2$  – абсолютные давления перед вакуумной трубкой и на выходе из системы сжатого воздуха, Па.

Удельный объем газа на входе в вакуумную трубку определим как:

$$v_1 = \frac{RT}{p_1}, \quad (4.7)$$

где  $R = 287$  Дж/(кг·К) – газовая постоянная для воздуха;  $T = 293$  К – температура воздуха.

$$f = \frac{\pi \cdot 0,003^2}{4} = 0,7 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2. \quad (4.8)$$

Давление  $p_1$  регулируется регулятором системы сжатого воздуха в диапазоне значений 0,5 – 12 атм, при этом система обеспечивает расход воздуха 5000 м<sup>3</sup>/ч. Так как воздух вытекает в атмосферу, то  $p_2 = 750$  мм.рт.ст = 1 атм.

$$v_1 = \frac{287,0 \cdot 293}{1,003 \cdot 10^5} = 0,83 \text{ м}^3 / \text{кг}. \quad (4.9)$$

Выражение, находящееся под знаком корня в (4.5), представляет собой удельный ток газа через трубку  $M_T$ , т.е. массовый расход газа через единицу выходной площади ( $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ). В соответствии с законом сохранения массы при установившемся течении величина массового расхода в любом  $i$ -м сечении сопла одна и та же:  $M_i = M_T = M_{Ti} f_i = \text{const}$ .

Теоретическую скорость истечения газа из трубки для адиабатного случая можно определить как:

$$w_T = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} p_1 v_1 \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}. \quad (4.10)$$

Произведем расчет зависимостей (4.1) и (4.4) от перепада давлений  $p_1 - p_2$  для различных случаев регулирования:

1.  $p_1 = 1,003 \text{ атм} = 100300 \text{ Па}$ ,  $p_2 = 1 \text{ атм} = 100000 \text{ Па}$ .

$$M_T = 0,7 \cdot 10^{-5} \sqrt{2 \frac{1,4}{1,4-1} \frac{100300}{0,83} \left[ \left( \frac{1}{1,003} \right)^{\frac{2}{1,4}} - \left( \frac{1}{1,003} \right)^{\frac{1,4+1}{1,4}} \right]} = 0,003 \text{ кг/с}, \quad (4.11)$$

$$w_T = \sqrt{2 \frac{1,4}{1,4-1} 100300 \cdot 0,83 \left[ 1 - \left( \frac{1}{1,003} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} \right]} = 22,1 \text{ м/с}. \quad (4.12)$$

2.  $p_1 = 1,05 \text{ атм} = 105000 \text{ Па}$ ,  $p_2 = 1 \text{ атм} = 100000 \text{ Па}$ .

$$M_T = 0,7 \cdot 10^{-5} \sqrt{2 \frac{1,4}{1,4-1} \frac{105000}{0,79} \left[ \left( \frac{1}{1,05} \right)^{\frac{2}{1,4}} - \left( \frac{1}{1,05} \right)^{\frac{1,4+1}{1,4}} \right]} = 0,008 \text{ кг/с}, \quad (4.13)$$

$$w_T = \sqrt{2 \frac{1,4}{1,4-1} 105000 \cdot 0,79 \left[ 1 - \left( \frac{1}{1,05} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} \right]} = 90 \text{ м/с}. \quad (4.14)$$

При расчете теоретических зависимостей (4.5, 4.8) установлено, что по мере увеличения перепада давлений (уменьшения отношения  $p_2/p_1$ ) скорость газа  $w_T$  увеличивается, достигая скорости звука  $a$ , и течение становится критическим.

Таким образом, в случае обработки внутренних поверхностей полимерного изделия магнитно-абразивной обработкой в газовой среде наиболее рациональными условиями следует считать такие, при которых скорость истечения газа из трубки  $w_T$  изменяется в диапазоне 20 – 90 м/с, а его расход  $M_T$  - 0,003 – 0,008 кг/с. Шероховатость обработанной внутренней поверхности под световод составляет по параметру  $R_a$  менее 0.2 мкм.

Разработанная конструкция полировальной головки достаточно просто и быстро монтируется на станке, обеспечивая тем самым значительное сокращение времени на обработку изделия, и высокоэффективно реализует принципы интегрированного магнитно-абразивного полирования внутренних поверхностей полимеров, не нарушая точности и качества уже полученных внешних поверхностей. Единственным условием ее работы является наличие исходного контура внутренней поверхности, который требует только окончательной финишной обработки.

## **4.6. Алмазно-искровое шлифование**

### **4.6.1. Сущность процесса**

Одним из новых путей повышения эффективности в шлифовании является интенсификация процесса на основе использования дополнительной энергии, в частности, электрической.

В Харьковском политехническом институте разработан новый процесс интенсифицированного алмазно-искрового шлифования (АИШ) [52]. Сущность его заключается в том, что при шлифовании в зону обработки вводится дополнительная энергия в форме электрических разрядов определенной мощности, длительности и частоты от автономных источников технологического тока. Шлифование выполняется токопроводными алмазными кругами на обычных станках с изоляцией круга и детали от общей массы станка. Процесс стабильно протекает в различных смазочно-охлаждающих средах, применяемых при шлифовании, с подачей их в зону обработки поливом, в том числе и СОТС на водной основе (например, 1,5-2 %-ый раствор  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ).

Электрические разряды в рабочей зоне оказывают определенное воздействие на поверхность обрабатываемой заготовки, на режущую поверхность круга и на срезаемую стружку.

Обработанная поверхность формируется в результате совместного действия режущих алмазных зерен и электрических разрядов. Под действием электрических разрядов происходит предразрушение микрослоя обрабатываемого материала с соответствующим улучшением обрабатываемости.

Следовательно, в зоне обработки совмещается механическое действие режущих зерен, осуществляющих срезание микростружек и электрофизическое действие разрядов. Оба этих процесса взаимосвязаны и в значительной степени влияют друг на друга. Поэтому зону шлифования следует рассматривать с одной стороны, как зону стружкообразования и контактно-фрикционного взаимодействия инструмента с металлом, а с другой - как межэлектродный промежуток.

Микрорезание алмазными зернами является доминирующим процессом. Он осуществляется практически непрерывно в любой момент времени; с

обрабатываемым материалом обязательно контактирует несколько режущих зёрен, осуществляющих съём металла. Работа зёрен может происходить как при введении в зону обработки дополнительной энергии, так и без неё.

Электрические разряды выполняют вспомогательную роль, их действие способствует интенсификации основного процесса, при этом характер влияния разрядов и эффективность процесса зависят от вида дополнительной энергии, её величины и от состояния межэлектродного промежутка, в частности - от вида срезаемых стружек, способствующих инициированию возникновения разрядов и одновременно шунтированию межэлектродного зазора.

Таким образом, межэлектродный промежуток при алмазно-искровом шлифовании имеет свои принципиальные особенности, которые и определяют характер электрических разрядов и эффективность их действия. Обычно зона обработки заполнена смазочно-охлаждающей жидкостью. В межэлектродном промежутке всегда находятся срезаемые стружки, частицы дисперсированного металла и продукты износа. Кроме основных стружек, формируемых перед режущим зерном, образуются также боковые стружки в результате пластического оттеснения металла по краям микроцарапин. При этом стружки перемыкают электроды, создавая токопроводные мостики.

В связи с этим можно говорить об электрических явлениях, эффектах в зоне обработки и характере разрядов, основываясь на трёх основных вариантах условий работы.

1. Работа в обычном режиме, когда стружка не перемыкает электроды или во всяком случае условия таковы, что перемыкание маловероятно (правка круга перед работой и шлифование крупнозернистыми кругами со срезанием короткой стружки и др.).

2. Работа с периодическим перемыканием межэлектродного зазора, когда период состояния «открытого» зазора и «перекрытого» стружками чередуются в определенном соотношении вероятностей.

3. Работа с постоянным перемыканием электродов срезаемой стружкой и частицами диспергированного металла.

В первом случае при наличии гарантированного зазора разряд возникает в результате пробоя межэлектродной среды в результате приложенного напряжения. В таких условиях целесообразно и наиболее эффективно использование импульсного высокочастотного напряжения.

Во втором, и особенно в третьем случае, когда межэлектродный промежуток шунтируется срезаемой стружкой, возникновение разрядов возможно как при работе, так и вследствие инициирования его перемыкающими элементами при прохождении по ним электрического тока. В данном случае возможно (кроме импульсного) применение энергии постоянного напряжения (или переменного промышленной частоты).

При работе с постоянным переключением электродов часть дополнительной энергии, вводимой в зону обработки, расходуется на нагрев переключающих мостиков.

Зона шлифования предопределяет нагрузки в электрической цепи источника дополнительной энергии.

Нагрузка промежутка включает: 1) электроразрядный участок; 2) сопротивление мостиков, переключающих межэлектродный зазор; 3) сопротивление смазочно-охлаждающей жидкости (как слабого раствора электролита), т.е. можно говорить о параллельном включении (между электродами) этих нагрузок.

При работе в зоне шлифования, характеризующейся гарантированным межэлектродным зазором, нагрузкой является канал разряда и сопротивление смазочно-охлаждающей жидкости.

При переключении электродов необходимо знать величину сопротивления стружки как шунтирующего мостика:

$$R_{стр} = R_{ом} + R_{стяг} + R_{пл} \quad (4.15)$$

где  $R_{ом}$  – омическое сопротивление мостика стружки;  $R_{стяг}$  – сопротивление «стягивания» (переходное сопротивление);  $R_{пл}$  – сопротивление пленок на контактных поверхностях стружки и связки.

$$R_{ом} = \rho \frac{l}{f} \quad (4.16)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление,  $l$  – длина стружки,  $f$  – площадь поперечного сечения стружки/.

Учитывая сложность расчётов сопротивления плёнки и сопротивления стягивания при практических работах можно ограничиться определением омического сопротивления. При этом важным вопросом является знание общего количества одновременно переключающих стружек

Электрические явления, происходящие в межэлектродном промежутке зоны шлифования весьма сложны. Они разнообразнее, чем при обычной электроэрозионной обработке в связи с быстрым перемещением электродов относительно друг друга, систематическим образованием переключающих элементов (стружка, частичками металла), изменением величины межэлектродного зазора, появлением и разрывом контактов.

Учитывая специфику межэлектродного промежутка зоны шлифования можно говорить в первую очередь о следующих доминирующих электроразрядных явлениях и процессах:

- электрические разряды, возникающие в результате пробоя межэлектродной среды;
- электрические разряды, образующиеся в следствие нагрева и

взрывного оплавления перемыкающих стружек (взрывная электроэрозия);

– электрические явления и разряды, происходящие при замыкании и замыкании электрической цепи;

– процессы, происходящие при скольжении соприкасающихся участков (электроэрозия скользящих контактов).

Разряды, связанные с пробоем промежутка, возникают между связкой шлифовального круга и стружкой или обрабатываемым материалом. При этом они могут быть кратковременными - в случае, если образующаяся стружка-электрод с большой скоростью перемыкает зазор после инициирования разряда или нормальной длительности - если условия позволяют полностью сформироваться разряду после пробоя.

Такой характер хорошо изучен. Под действием разряда происходит быстрый высокотемпературный локальный нагрев поверхности электродов с образованием микролунок за счет плавления, кипения, испарения металла и выброса его в виде микрошариков. При этом анод (в нашем случае – круг) претерпевает, обычно меньше повреждения, чем катод. В зависимости от условий доминирует тот или иной характер физического воздействия электрода.

Такой разряд может оказывать косвенные воздействия и на поверхность режущего зерна, очищая его от наростов, налетов и при большой мощности способствуя образованию на режущей поверхности субмикроромок.

Отметим, что пробой жидкости на водной основе, аналогичен пробоем газовой среды, он носит тепловой характер, с образованием перед пробоем своеобразного парогазового мостика. Пробой межэлектродного промежутка, заполненного смазочно-охлаждающей жидкостью на водных растворах возможен при больших зазорах, чем при пробое обычных диэлектриков. Объём лунок, полученных в жидкой среде больше, чем воздушной, а в слабо токопроводной – меньше чем в диэлектриках.

Опыты по изучению действия единичного разряда на электроды, показали, что в наших условиях объём лунок на аноде получается на 10÷15% больше, чем на катоде. Было установлено, что наибольшая интенсивность действия разрядов имеет место при зазорах: в керосине 4-16 мкм и 5 – 30 мкм в водном растворе (0,5 – 3%  $\text{NaNO}_2$  и  $\text{CaCO}_2$  (анод – связка М1, катод сталь ШХ – 15).

Объём лунки при оптимальных зазорах, при энергии импульса 0,15Дж составляет  $60 \div 80 \cdot 10^{-5} \text{ мм}^3$  для диэлектрической среды и  $30 \div 55 \cdot 10^{-5} \text{ мм}^3$  для водных растворов.

Взрывная электроэрозия происходит при условии наличия перемыкающих элементов – тонких стружек или мостиков из их обломков – при прохождении по ним тока. Если подводимой энергии (мощности) достаточно, то перемыкающий элемент нагревается и при достижении

определённой температуры оплавляется в одном из наиболее нагретых местах со взрывным выбросом расплавленного металла.

Наибольшая вероятность оплавления – это средняя часть стружки, где меньше теплоотвод или верхняя её часть, где, в связи с большим сопротивлением, возможен более сильный нагрев. Образующийся при этом кратковременный разряд возникает сначала между элементами стружки, а затем (возможен переход) действует между связкой круга и стружкой.

Такой характер электрической эрозии в зоне шлифования может иметь место при срезании тонких длинных стружек, перекрывающих межэлектродный промежуток, при импульсах достаточной длины или при постоянном напряжении (возможно и небольшой величины).

При этом следует отметить, что локализация такой эрозии в средней или верхней части стружки у связки инструмента существенно уменьшает вероятность образования лунок на обработанной поверхности, что предопределяет качество шлифованной детали.

Электрические разряды, возникающие в результате разрыва цепи, имеют место при условии, если межэлектродный промежуток перемыкается стружкой. Разряд может быть инициирован при надломе стружки, а также при разрушении её контакта со связкой и при отрыве (отделении) стружки от основного металла в момент окончания стружкообразования и выхода зерна из зоны резания. Кроме того, разрыв цепи может быть в месте контакта связки с обрабатываемым металлом, однако, учитывая увеличенное выступание зёрен при алмазно-искровой обработке, вероятность такого рода контактов мала.

Процессы, протекающие при размыкании контактов, связаны с металлом и срезаемой стружкой приводят к локальному оплавлению материала на контактном участке; при этом происходит мостиковый перенос – с анода удаляется материал с переносом на катод, возможен также съём металла с анода, в результате прилипания к катоду разогретой и оплавленной точки анода с образованием на нем микроуглубления.

При образовании дуги происходит более интенсивное воздействие на анод с плавлением, кипением и испарением металла, при этом анодное пятно оказывается намного больше катодного. Однако вероятность образования дуги в зоне шлифования мала.

Указанные разряды имеют малую длительность, поэтому их электроэрозионное воздействие на электроды невелико.

Электроэрозия скользящих контактов происходит в местах соприкосновения и скольжения электродов при условии неплотных, прерывающихся и вновь возникающих контактов. При шлифовании это участки скольжения связки по металлу и стружки по связке.

Электрические разряды, действующие в зоне шлифования, оказывают существенное влияние на рабочую поверхность инструмента и на формирование поверхностного слоя изделия:

- способствуют постоянному стабильному поддержанию высоты выступания режущих зёрен, за счёт эрозионного съёма слоёв связки в межзёрненном пространстве и обеспечивают высокую режущую способность инструмента;

- обеспечивают устранение контакта связки круга с обрабатываемым металлом;

- устраняют засаливание инструмента, предотвращают образование наростов на зёрнах и наливов на связке;

- возбуждают высококачественные вибрации в зоне обработки, изменяющие характер контакта зёрен с металлом и облегчающие процесс микрорезания;

- способствуют лучшему проникновению сказочно-охлаждающей жидкости в зону резания и на контактные участки режущей поверхности круга с металлом;

- являются дополнительным источником тепла, изменяют тепловой баланс шлифования;

- оказывают локальное тепловое (высокотемпературное) воздействие на формируемую поверхность, образуя на ней микролунки.

Анализ перечисленных выше особенностей действия разрядов позволяет сделать вывод о том, что это действие имеет как положительное, так и отрицательное влияние на качество обработки, и это необходимо учитывать при поиске путей улучшения качества обработанной поверхности и при создании новых технологий.

#### **4.6.2. Особенности АИШ твёрдых сплавов**

В процессе АИШ, например, железоуглеродистых сплавов воздействие эрозионных разрядов на материал, вызывающее предразрушение поверхностного слоя, способствует облегчению съёма материала. При обработке твёрдых сплавов, особенно безвольфрамовых (БТС), в силу их специфических свойств, предразрушение может привести к значительным дефектам и поэтому оно не желательно; в связи с этим АИШ твёрдых сплавов целесообразно производить с обратной полярностью (круг – анод), когда действие разрядов, в основном, направлено на поверхность круга, способствуя его самозатачиванию, а поверхностный слой твёрдого сплава подвергается механическому воздействию алмазными зёрнами [59]. Практика АИШ твёрдых сплавов показала, что в широком диапазоне условий нет необходимости применения автономного электрода, так как образующаяся пылевидная стружка, соизмеримая с размерами зерен карбидов вольфрама и титана, не снижает развитости рельефа и степени самозатачиваемости алмазных кругов.

При АИШ в качестве рабочей среды применяют диэлектрические жидкости или слабые электролиты (от  $10^{-3} \text{ ом} \cdot \text{см}^{-1}$  до  $10^{-6} \text{ ом} \cdot \text{см}^{-1}$ ); в частности наиболее широко используются 0,5...3 %-ные водные растворы соды, эмульсии и другие. АИШ, сохраняя достоинства алмазного электрохимического шлифования, имеет ряд преимуществ: устраняется коррозия оборудования, упрощаются вопросы вентиляции рабочего места, уменьшается степень загрязнения жидкой рабочей среды, так как материал снимается в виде стружки, а не объёмного гидроокисного осадка, снижается в 10 ... 20 раз рабочий ток, уменьшается износ круга, снижается удельная себестоимость обработки. Устранение засаливания и стабилизация высоких показателей работоспособности кругов является одним из важнейших преимуществ АИШ перед другими способами шлифования.

При этом следует заметить, что устраняется отрицательное влияние связки круга, контакт которой с обрабатываемой поверхностью способствует появлению дополнительных силовых и тепловых нагрузок. Самостоятельная роль связки при взаимодействии рабочей поверхности алмазного круга с материалом впервые была показана М.Ф. Семко.

Существенно отметить, что при АИШ более полно используются возможности развитости режущего рельефа, а, значит, и собственно алмазных зёрен.

Ранее нами совместно с М.Ф. Семко было показано, что при резании единичными алмазными зёрнами твёрдого сплава Т15К6 развитость режущей поверхности алмазных зёрен сохраняется практически до полного износа. При этом установлено, что отдельные кромки зерна способны производить резание-царапание твёрдого сплава при весьма малых толщинах среза. Высказанные нами положения были подтверждены свыше десяти лет спустя в работах Малкина С. и Зелвера О.

Анализ условий контактирования на входе алмазного зерна в материал (доведенная пластинка твёрдого сплава выставлялась с небольшим уклоном – 10 мкм на длине 20 мм) показал, что скольжение зёрен по поверхности материала (на микрофотографиях следов) не обнаруживается, и процесс микрорезания начинается при толщинах среза  $z = 0,1$  мкм.

В связи с выявленной возможностью получения тонких срезов возникает необходимость оценки соотношения толщин среза  $z$  и степени остроты режущей кромки зерна. Как известно, вершина режущего зерна является округленной и характеризуется радиусом округления  $r$ . Ещё Ландау Л.Д. теоретически доказал, что «равновесная форма кристаллов должна состоять из небольшого числа плоских участков (граней с малыми индексами, которые однако не пересекаются под углом, а соединены закругленными участками» [55].

Если учесть, что в большинстве работ для зернистости, например 250/200, оцениваемые значения радиусов округления составляют 3–7 мкм, то

в нашем случае соотношение  $z/\rho = 0,03 \div 0,01$ . Вместе с тем известно, что благоприятное соотношение  $z/\rho$ , при котором процесс резания превалирует над пластическим выдавливанием, равно 0,5; при этом характер деформации в зоне контакта определяется по изменению условных напряжений резания.

Имеются данные, свидетельствующие о том, что процесс резания может осуществляться и при  $z/\rho = 0,01$ , но при этом не указывается, превалирует ли он над пластическим выдавливанием. Приведенное соотношение  $z/\rho$  получено при микрорезании пластичных материалов специально изготовленными инденторами на весьма низких скоростях.

Таким образом, полученные нами значения соотношения  $z/\rho$ , при которых происходит микрорезание, примерно на порядок меньше принятых в литературе. Это свидетельствует о наличии на зернах субмикрокромки и об их роли в процессе съёма материала, а также о более высокой остроте режущих микрокромки в сравнении с известными значениями. На микрофотографии, полученной с помощью электронного микроскопа показана характерная поверхность алмазного зерна с субмикрокромками в круге АС6 100/80 М1-01 после хрупкого микровыкрашивания режущей кромки (шлифование ТН20). О роли субмикрорельефа алмазных зерен в формировании обработанной поверхности указывается также в работе [53].

#### **4.6.3. Работоспособность алмазных зёрен**

Представляет интерес анализ работоспособности зёрен при микрорезании различных материалов. При этом следует иметь в виду, что оценка износа и работоспособности единичных зерен при каких-то конкретных условиях не может однозначно характеризовать его поведение в круге. И характер, и «продолжительность жизни» зерна в круге будет иным. С одной стороны, взаимодействие режущей поверхности круга с материалом (теплообразование, продукты износа и др.) будут ужесточать условия работы зерна, с другой – выкрашивания и сколы режущей кромки на определенный период предохраняют его от контактирования с обрабатываемой поверхностью и тем самым продлевают его сохранность до достижения предела усталостной прочности. Следует иметь в виду и выпадение зёрен. Поэтому количество циклов нагружения рабочей поверхности круга при шлифовании с позиций работоспособности зерна не сопоставимо с количеством циклов нагружения единичного зерна до соответствующей величины износа.

Кроме того, по мере самозатачивания и достижения активного выступления, в процессе АИШ, зерно будет работать с различными толщинами среза. Поэтому, например, при расчётном моделировании износа круга следует учитывать не вообще установленный коэффициент работоспособности зерна какой-то марки при микрорезании обрабатываемого

материала, а его функциональную зависимость от толщины среза, и расчёт вести для активных рабочих зёрен, износ которых и определяет размерный износ алмазного круга в установившемся режиме шлифования.

По коэффициенту работоспособности ( $R$ ) при микрорезании различных материалов можно оценить их обрабатываемость. Например, на рис. 4.74 показано влияние толщины среза при микрорезании сплавов Т15К6, ТН20 и КТН16 зерном АС32 250/200.

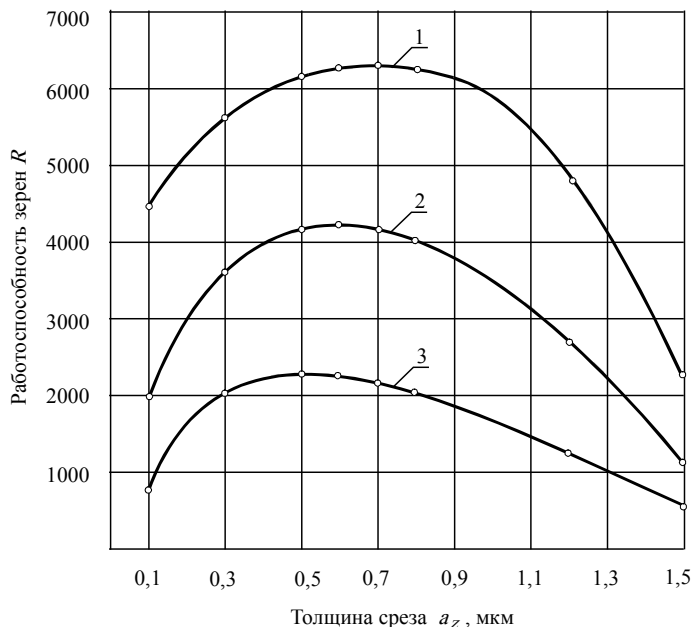


Рисунок 4.74 – Влияние толщины среза на работоспособность алмазных зерен:

зерно АС32 250/200;  $V = 25$  м/с; 1 – Т15К6; 2 – ТН20; 3 – КТН16

Наибольшие значения  $R$  имеют место для сплавов Т15К6 во всем диапазоне  $z$ . Повышенный размерный износ при взаимодействии с безвольфрамовыми твёрдыми сплавами приводит к более низким значениям работоспособности единичных зёрен. Наибольшие значения коэффициента работоспособности для сплавов ТН20 и КТН16 смещаются в сторону несколько меньших значений толщин среза. При обработке безвольфрамовых твёрдых сплавов алмазные зёрна работают в более тяжелых условиях, поэтому их повышенный износ начинается при меньших толщинах среза. Рост толщин среза интенсифицирует износ алмазных зёрен, что приводит к увеличению объёма изношенной части зерна, уменьшению объёма снятого

материала и, следовательно, к снижению работоспособности. Микрорезание с малыми толщинами срезов приводит, как отмечалось, к большим значениям условных напряжений микрорезания, что увеличивает износ зёрен и также приводит к снижению работоспособности.

Результаты исследований по определению работоспособности алмазных зерен разных марок при микрорезании твердого сплава Т15К6 с различными толщинами среза представлены в табл. 4.6.

Таблица 4.6 – Значения коэффициентов работоспособности зёрен

Толщина среза $z$ , мкм	АС4	АС6	АРВ1	АС32
0,1	750	1625	1960	3500
0,3	1100	2120	2280	5620
0,5	1620	2625	3010	6100
0,7	780	2470	2530	6210
1,0	630	2305	2410	5950
1,5	115	1720	1800	2240

Как видно из таблицы, наибольшие значения коэффициента работоспособности для всех испытанных зёрен находятся в диапазоне толщин среза  $z = 0,3 \div 0,7$  мкм.

Следует отметить, что порядок расположения различных марок зёрен по увеличению коэффициентов работоспособности совпадает с соответствующим расположением их по возрастанию динамической прочности.

Сравнительная работоспособность зёрен АС6 при микрорезании сплавов Т15К6 и ТН20 с различными толщинами среза приведена в табл. 4.7.

Таблица 4.7 – Значения коэффициента работоспособности алмазных зёрен АС6

Сплав	Толщина среза, мкм					
	0,1	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0
Т15К6	1625	2625	2305	1720	1375	710
ТН20	1140	1840	1615	1200	960	510

Поскольку зёрна АС6 используются в рассматриваемых нами кругах на металлической связке М1-01, для них получены зависимости коэффициента работоспособности от толщины среза:  
для сплава Т15К6

$$R(z) = 1458,98 + 2970,56z - 2499,62z^2 + 476,27z^3 ; \quad (4.17)$$

для сплава ТН20

$$R(z) = 1021,29 + 2080,40z - 1750,71z^2 + 335,31z^3. \quad (4.18)$$

Эти зависимости используются для расчёта объёма изношенных частей рабочих зёрен и определения размерного износа кругов.

#### **4.6.4. Комплексные показатели процесса**

Большое значение при АИШ имеют комплексные показатели процесса, характеризующие физико-механические условия взаимодействия круга и обрабатываемого материала. К ним прежде всего относятся коэффициент шлифования ( $K_{ш}$ ) и энергоёмкость процесса ( $B_m$  и  $A_{yo}$ ). Коэффициент шлифования  $K_{ш} = \frac{P_z}{P_y}$  (отношение тангенциальной силы к радиальной)

отражает процесс резания в динамике, влияние температурно-скоростного фактора, свойств обрабатываемого материала, состояние рабочей поверхности круга.

Коэффициент шлифования АИШ, как правило, меньше единицы, а при определенных условиях обычного шлифования его значение может приближаться к коэффициенту трения пары – притупленный шлифовальный круг и обрабатываемый материал.

При больших значениях коэффициента шлифования взаимодействие абразивного инструмента с материалом более эффективно. Следует также отметить, что в условиях упругого АИШ большему значению силы  $P_z$  соответствует лучшая обрабатываемость материала, так как тангенциальное усилие определяется суммарным мгновенным сечением среза.

В процессе, обеспечивающем самозатачиваемость и устойчивое состояние режущей поверхности, для оценки обрабатываемости материалов и режущих свойств кругов удобно также пользоваться его энергетической характеристикой. В качестве критериев в основном применяют удельную энергоёмкость  $B_m$  и удельную работу шлифования  $A_{yo}$ .

Удельная энергоёмкость шлифования оценивает энергию (работу  $A$ ), расходуемую на снятие массы ( $\Delta M$ ) материала:

$$B_m = \frac{A}{\Delta M}, \quad (4.19)$$

а удельная работа шлифования учитывает работу, затрачиваемую на объёмный съём:

$$A_{yo} = \frac{P_z V_k}{Q_m}, \quad (4.20)$$

где  $P_z$  – тангенциальная сила резания,  $V_k$  – скорость резания,  $Q_m$  – производительность процесса.

На первый взгляд оба критерия однозначно характеризуют процесс. Действительно, если производить оценку условий шлифования при обработке конкретного материала, то критерии  $B_m$  и  $A_{yo}$  будут в равной мере характеризовать энергетические затраты, приходящиеся на единицу объёма или массы сошлифованного материала. Вместе с тем, при определении обрабатываемости различных материалов использование критерия  $A_{yo}$  может дать неверное представление об энергетической характеристике процесса. Например, сравнительная оценка обрабатываемости сплавов Т15К6 и ТН20 показывает, что безвольфрамовый сплав хуже обрабатывается, производительность АИШ заметно ниже и т.д., и поэтому удельная энергоёмкость его шлифования  $B_m$  естественно выше. Однако, учитывая, что плотность сплава ТН20 в два с лишним раза меньше плотности Т16К6, при пересчете на  $A_{yo}$  при каких-то условиях обработки удельная работа шлифования безвольфрамового твердого сплава может оказаться ниже, чем сплава Т15К6. Поэтому при сравнении энергетических характеристик процесса шлифования различных материалов более целесообразно применять критерий  $B_m$ .

С другой стороны, при АИШ различных композиций материалов с неодинаковыми физико-механическими свойствами оценка энергетических затрат по удельной работе шлифования  $A_{yo}$  (на единицу объема снятого материала) более достоверна и удобна.

Следует отметить, что удельная энергоёмкость шлифования ( $B_m$ ,  $A_{yo}$ ) не может однозначно характеризовать эффективность процесса, так как её низкое значение может быть получено при малой производительности и незначительное изменение может дать неправильное представление о процессе. Так, например, для сплавов Т15К6 и ТН20 изменение нормального давления незначительно влияет на удельную энергоёмкость, в то же время производительность и удельная себестоимость – существенно отличаются. Благоприятные условия шлифования создаются при увеличении коэффициента шлифования и одновременном уменьшении  $B_m$  или  $A_{yo}$ .

В общем случае удельную энергоёмкость целесообразно оценивать в интервалах варьирования факторов процесса, обеспечивающих нахождение оптимального значения качества и производительности.

#### **4.6.5. Особенности износа алмазных кругов и зёрен**

Для процесса АИШ характерны заметные особенности износа режущей поверхности и алмазных зёрен.

«Засаливание» круга в целом, т. е. заполнение межзёрненных пространств продуктами шлифования не обнаруживается. Действие разрядов способствует

удалению и оплавлению образующихся стружек, чем обеспечивается активное выступание зёрен. Отдельные стружки могут налипать на контактирующие с материалом режущие кромки и не подвергаться действию разрядов, так как зерно нетокопроводно.

Если засаливание круга при АИШ в силу действия разрядов не происходит, то заполнение межкромочных пространств зерна срезаемыми микростружками в начальной стадии исключить невозможно; поэтому субмикрорельеф зерна может частично потерять активность (рис. 4.75).

Однако при более обширном покрытии поверхности зерна частицами обрабатываемого материала появляется вероятность контакта со срезаемой стружкой, в результате чего действие разряда может быть направлено не только в межзеренное пространство, но и на зерно. Это способствует локальному разрушению участка зерна; при этом активизируется как режущая поверхность собственно зерна, так и круга, т. е. обеспечивается самозатачиваемость кромок (рис. 4.76).

В процессе взаимодействия алмазных зёрен с твёрдым сплавом площадок износа, как правило, не возникает, поверхность зёрен весьма развита, причем размеры отдельных субмикроромок могут составлять доли микрометра (рис. 4.77; рис. 4.78).

Шлифование твёрдых сплавов может сопровождаться усталостным характером износа зёрен, либо отдельных их кромок. Известно, что появление кольцевых трещин на поверхности алмаза является следствием того, что алмаз неоднократно подвергается напряжениям; причем трещины появляются при напряжениях, значительно меньших, чем при единичном нагружении. Кольцевые трещины характерны для поверхностей контакта алмазных зёрен с твёрдыми сплавами (рис. 4.79; рис. 4.80). От первичных трещин начинают ветвиться новые микротрещины, которые также приобретают кольцеобразный характер (рис. 4.80). Можно сделать вывод, что усталостные процессы при износе алмазных зёрен в кругах существенны, они способствуют сколам отдельных участков зёрен (рис. 4.79) и микровыкрашиваниям режущих кромок.

Следует иметь в виду, что в отдельных случаях при большей энергии импульсов (частота следования  $f = 22$  кГц) наблюдается более интенсивное воздействие разрядов на отдельные участки зерна, в результате чего может иметь место вязкое разрушение кромок (рис. 4.81).

В заключение выскажем предположение о возможном эвтектическом изнашивании алмазных зёрен в кругах. Впервые такой вид изнашивания алмазов отметил Семенов А. П. [58], а принципиальная возможность эффекта контактного (совместного) плавления была показана ранее Боуденом и Ридлером.

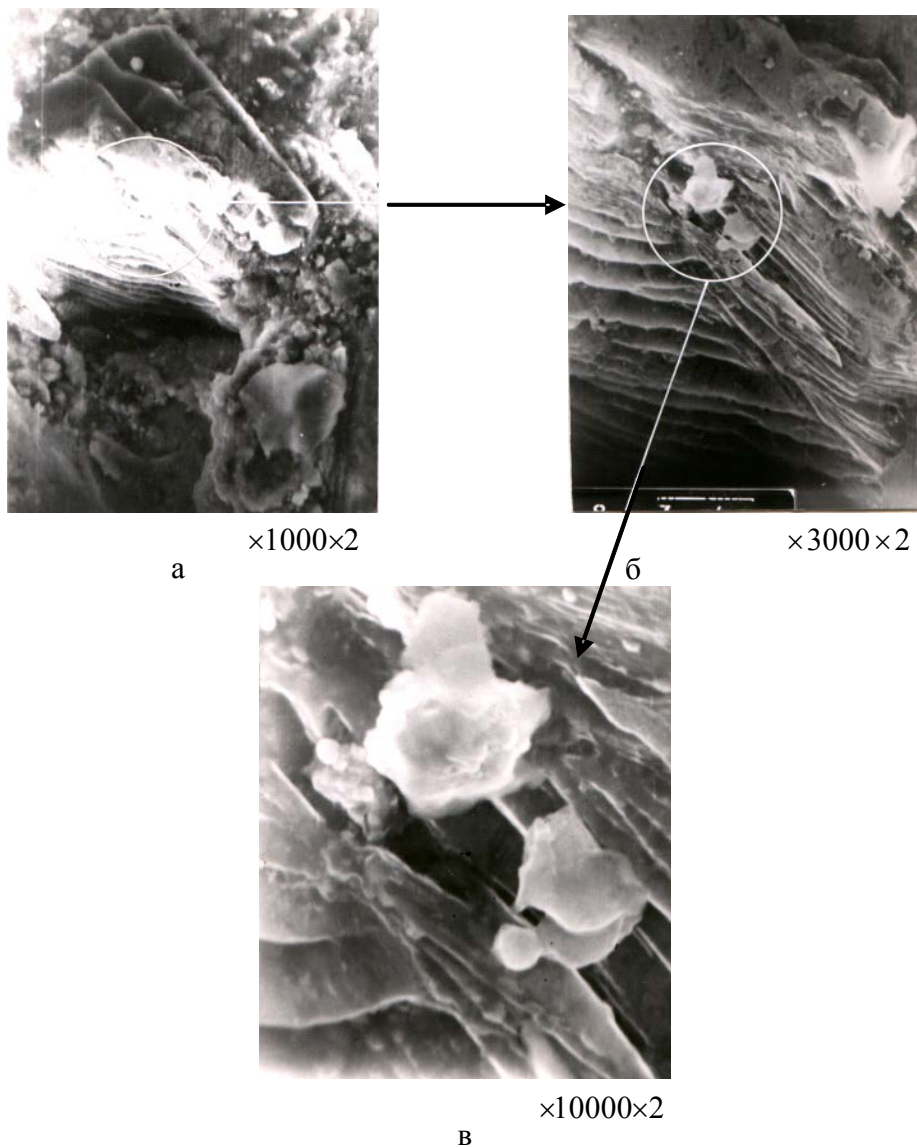


Рисунок 4.75 – Межкромочное засаливание микростружками.  
Условия АИШ:  $P = 2,0$  МПа;  $V = 30$  м/с;  $f = 88$  кГц;  
материал Т15К6; круг 12A2-45° AC6 100/80 M1-01-4

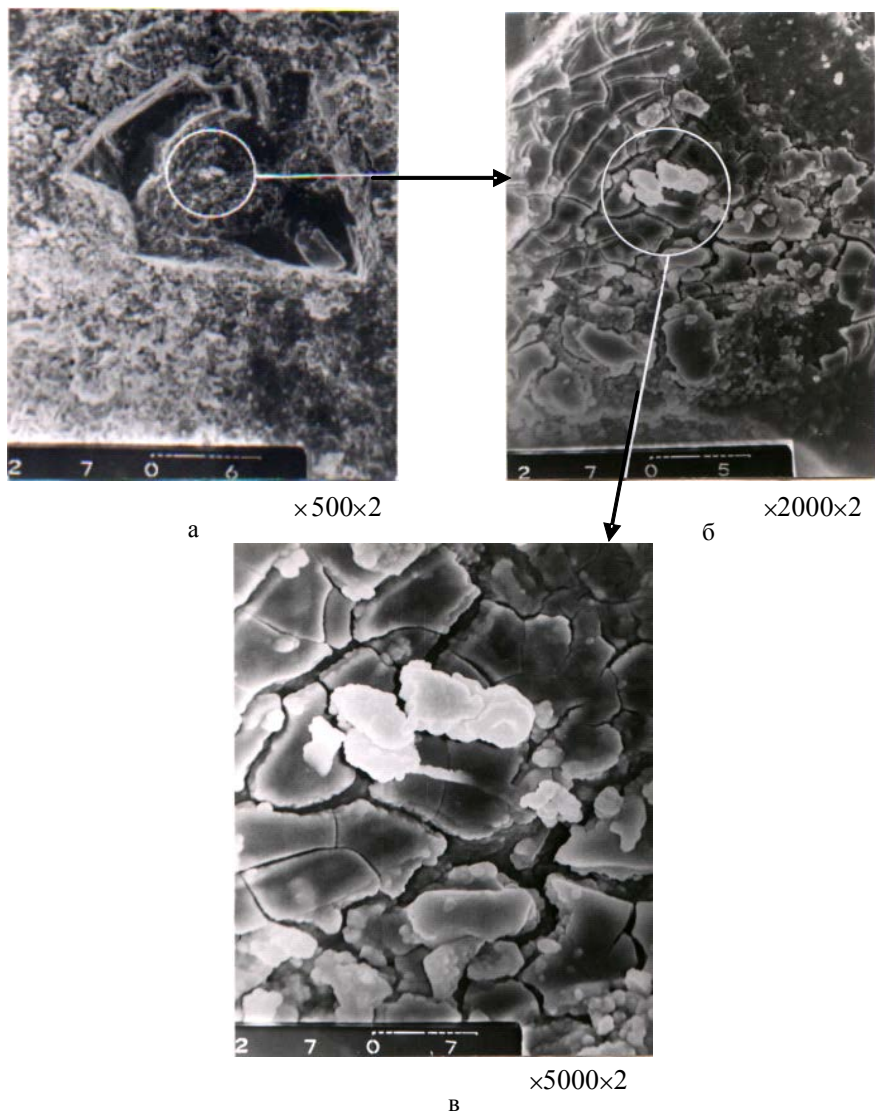


Рисунок 4.76 – Локальное разрушение участка зерна.  
Условия АИШ:  $P = 2,0$  МПа;  $V = 30$  м/с;  $f = 88$  кГц;  
материал ТН20; круг 12A2-45° АС6 100/80 МВ1-4

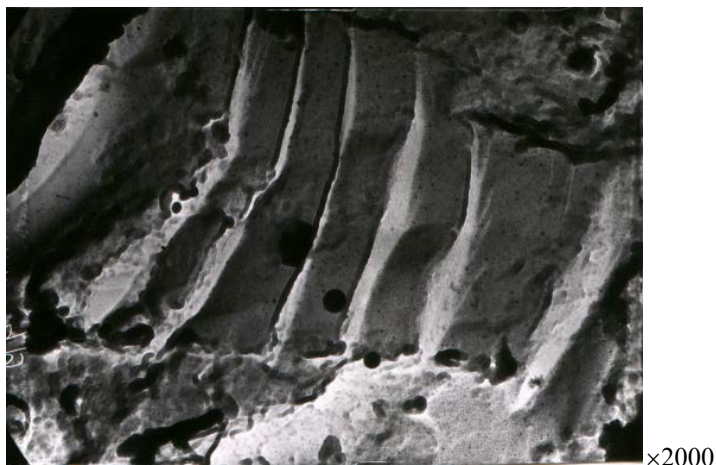
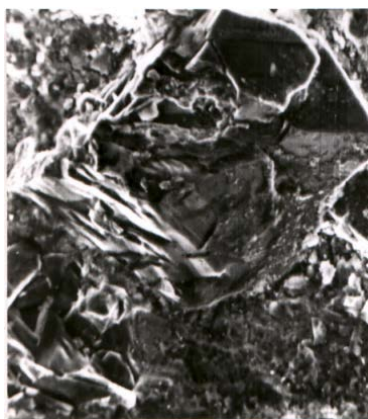


Рисунок 4.77 – Развитый рельеф зерна с субмикрочромками после террасообразного скола.

Условия АИШ:  $P = 1,2$  МПа;  $V = 25$  м/с;  $f = 88$  кГц;  
материал ТН20; круг 12А2-45° АС6 100/80 МВ1-4



×3000×2

а



×500×2

б

Рисунок 4.78 – Субмикрочромки алмазного зерна.

Условия АИШ:  $P = 1,2$  МПа;  $V = 25$  м/с;  $f = 88$  кГц; материал Т15К6;  
круг 12А2-45° АС6 100/80 МВ1-4

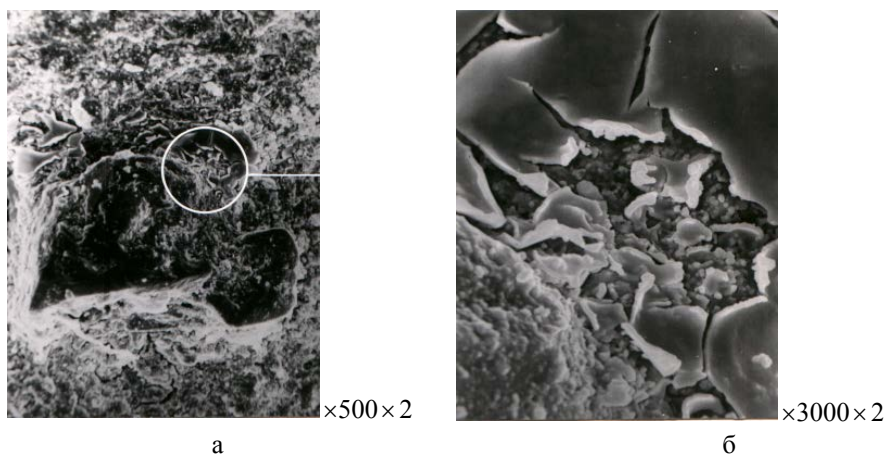


Рисунок 4.79 – Усталостный износ отдельных элементов зёрен.  
Условия АИШ:  $P = 1,4$  МПа;  $V = 30$  м/с; круг 12A2-45° AC6 100/80 M1-01-4

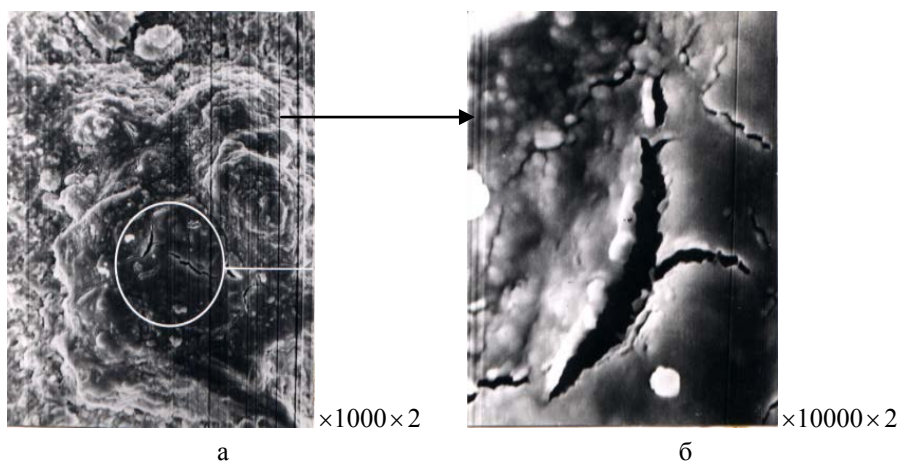


Рисунок 4.80 – Развитие микротрещин на поверхности алмаза.  
Условия АИШ:  $P = 1,2$  МПа;  $V = 25$  м/с;  $f = 88$  кГц;  
материал Т15К6; круг 12A2-45° AC6 100/80 M1-01-4

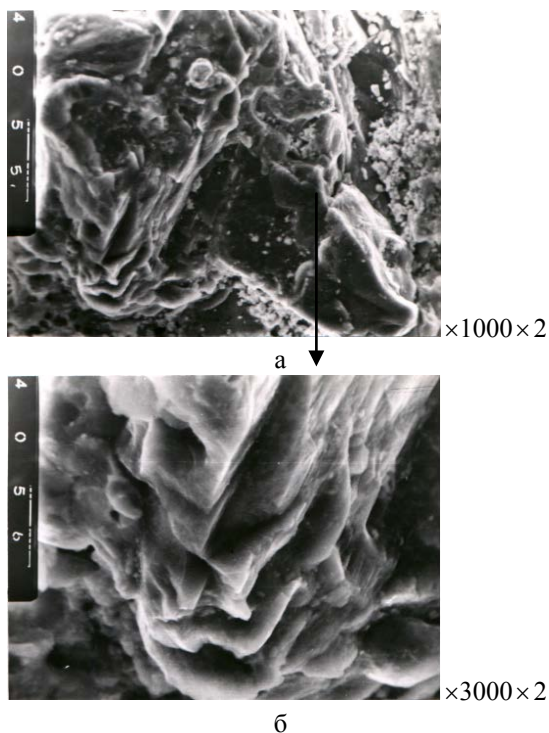


Рисунок 4.81 – Вязкое разрушение микрокромки.

Условия АИШ:  $P = 1,2$  МПа;  $V = 25$  м/с;  $f = 22$  кГц; материал Т15К6;  
круг 12A2-45° AC6 100/80 MB1-4

При контактировании алмаза и графита с металлами и сплавами, дающими с углеродом диаграммы состояния эвтектического типа (металлы триады железа – железо, кобальт, никель, последние, как известно, входят в состав твердых сплавов), при достижении температуры плавления соответствующей эвтектики происходит совместное эвтектическое плавление. При этом образуется прочное соединение материала с графитом или алмазом через слой застывшей эвтектики. Воздействие разряда на границу между зерном и связкой, либо на зерно, несомненно, способствует возникновению условий, необходимых для эвтектического плавления контактирующих поверхностей.

Характерные микрофотографии поверхностей предполагаемого эвтектического изнашивания приведены на рис. 4.82. На снимках видны «каплеобразные наплывы застывшей эвтектики». О высокой прочности и хрупкости застывших «язычков» свидетельствует тонкая, ровная, волосяная

трещина на рис. 4.82. Таким образом, принципиальная возможность эвтектического изнашивания алмазов, высказанная Семеновым А.Н., может иметь место и при АИШ твёрдых сплавов.

Говоря об особенностях износа алмазных зёрен в кругах, следует заметить, что даже в конкретных условиях взаимодействия кругов с различными материалами нельзя делать выводы о каких-либо обозначенных видах износа, присущих данному процессу. Различные участки и кромки алмазного зерна в одном и том же процессе шлифования будут подвержены различным видам износа в зависимости от характера взаимодействия их с обрабатываемым материалом.

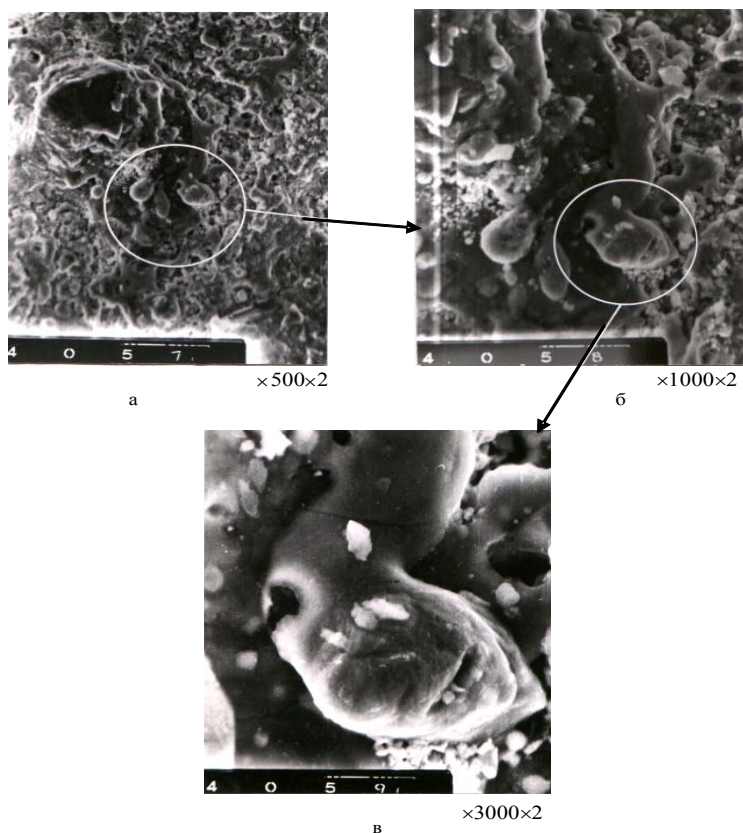


Рисунок 4.82 – Эвтектическое изнашивание зерен.  
Условия АИШ:  $P = 1,2$  МПа;  $V = 25$  м/с;  $f = 22$  кГц; материал ТН20;  
круг 12А2-45° АС6 100/80 МВ1-4

#### **4.6.6. Остаточные напряжения**

Алмазно-искровое шлифование, как отмечалось, способствует достижению развитого, устойчивого рельефа режущей поверхности круга. Понятно, что взаимодействие такого рельефа с обрабатываемым материалом и связанное с ним введение дополнительной энергии в зону шлифования вызовет специфическое воздействие силового и температурного факторов на формирование состояния поверхностного слоя. Неоднородная по глубине, а также в микрообъемах приповерхностного слоя твердых сплавов пластическая и термопластическая деформация способствует возникновению остаточных напряжений.

Взаимосвязь остаточных напряжений с прочностными характеристиками и работоспособностью деталей общеизвестна. Остаточные напряжения проявляют себя, как и всякие другие, например, рабочие напряжения. Если результат их совместного действия не превышает предела упругости, то для них сохраняется принцип упругого наложения. Понятно, что с превышением предела упругости возникает пластическое течение в соответствии со свойствами данного материала и независимо от того, какой род напряжений в нём действует; в этих условиях количественно изменяются остаточные напряжения, т.е. происходит их перераспределение. Таким образом, можно отметить как справедливое существующее мнение о том, что влияние остаточных напряжений определяется законами течения и разрушения материала, которые еще не изучены.

В связи с этим нам представляется, что выводы о потенциальной работоспособности изделий по сформированным остаточным напряжениям требуют весьма взвешенного подхода. Многое здесь зависит от конкретных свойств обрабатываемого материала и особенно условий, в которых будет находиться изделие в процессе эксплуатации. Однозначный вывод о благоприятных остаточных напряжениях на рабочих поверхностях инструментов не имеет реального смысла и значения; в зависимости от свойств материала инструмента, вида обработки (фрезерование, развертывание, точение) условия нагружения режущих поверхностей будут существенно отличаться. Даже в одном процессе точения в зависимости от сечения среза и скорости резания, геометрических параметров резцов и свойств материала остаточные напряжения по-разному могут влиять на показатели работоспособности инструмента; например, образование элементной или сливной стружки, работа в зоне наростообразования или за ее пределами, точение с малой толщиной среза, когда сила  $P_y$  может превышать  $P_z$  – все это при одинаковых остаточных напряжениях по-разному отразится на износостойкости резцов.

Вместе с тем, следует заметить, что оценка взаимосвязи остаточных напряжений и работоспособности изделий и инструментов из твердых

сплавов может быть более достоверной. У хрупких материалов при нагружении малая возможная величина пластической деформации не позволяет нейтрализовать влияние остаточных напряжений. Тем не менее, существуют различные мнения по влиянию остаточных напряжений на прочность и износостойкость твердых сплавов. Можно считать установленным, что для хрупких материалов в условиях знакопеременных нагрузок остаточные напряжения оказывают значительное влияние на усталостную прочность; растягивающие напряжения снижают прочность в 1,2 – 1,5 раза по сравнению с ненапряженным состоянием. Подобное мнение высказывается и при оценке взаимосвязи остаточных напряжений и прочности на микроскалывание – увеличение напряжений сжатия повышает прочность и наоборот.

По вопросу влияния остаточных напряжений на износостойкость твердого сплава однозначного мнения нет. В ряде работ показано, что большим сжимающим напряжениям соответствует большая износостойкость инструментов. Имеются сведения и о том, что износ твердого сплава возрастает, когда в приповерхностном слое формируются значительные напряжения независимо от их знака. Вместе с тем, существует мнение, что напряжения сжатия при испытании трением диска значительно ускоряют износ твердого сплава, а растягивающие – действуют двойко в зависимости от их величины – напряжение до 0,5 ГПа (50 кг/мм<sup>2</sup>) снижают износ твердого сплава, а напряжения, приближающиеся к пределу прочности твердого сплава, резко увеличивают износ.

Некоторые различия в оценке взаимосвязи остаточных напряжений с износостойкостью объясняются, по-видимому, тем, что в одних случаях речь идет о макронапряжениях, а в других – о суммарных ориентированных напряжениях, которые неадекватны тривиальным напряжениям первого рода, несмотря на характер рентгенографического проявления. Иными словами, получаемые рентгенографическими методами результаты отражают суммарный эффект, вызванный как напряжениями первого рода, так и ориентированными микронапряжениями [60]. Интересно отметить, что о влиянии микронапряжений (напряжений второго рода) на прочностные свойства также нет определенного мнения. Отмечается, что их влияние на механические свойства остается неизвестным, и во многом может оказаться аналогичным влиянию макронапряжений; вместе с тем, очевидно, что поскольку начало разрушения является микроскопическим, оно не может быть описано макроскопическими эффектами. Некоторые авторы считают, что изменение искажений второго рода в несколько раз не вызывает изменения в сопротивлении пластической деформации, а является лишь фактором, сопутствующим упрочнению, другие исследователи полагают, что нет оснований отрицать влияние микроискажений на прочность.

Есть данные и о том, что после шлифования твёрдых сплавов связь прочности с микронапряжениями установить не удалось. Между тем, влияние микронапряжений на процесс износа твёрдых сплавов является несомненным, так как разрушения в условиях эксплуатации начинаются на кристаллитном уровне [60]. При одинаковых макронапряжениях может иметь место различие в значениях микронапряжений. Поэтому представляет интерес анализ взаимосвязи износостойкости шлифованных инструментов не только с макронапряжениями либо суммарными ориентированными напряжениями, но и с межфазными микронапряжениями. Это особенно важно в тех случаях, когда не удастся обнаружить корреляции между износостойкостью изделий (инструментов) и макронапряжениями.

Остаточные ориентированные напряжения  $\sigma$  в поверхностном слое твёрдых сплавов определялись рентгенографическим способом многократных наклонных съёмок ( $\sin^2 \psi$ -метод) [60] на установках УРС-50ИМ и ДРОН-2 в фильтрованном излучении железного и кобальтового анодов. В сравнении с механической тензометрией напряженного состояния используемый метод позволяет измерять остаточную деформацию (остаточные напряжения) без разрушения (последнего травления) образца, исследовать влияние условий АИШ на состояние отдельных фаз многокомпонентного материала, определить роль макро- и межфазных микросоставляющих суммарных ориентированных напряжений в формировании остаточного напряженного состояния поверхностного слоя материала. Это позволяет более достоверно установить взаимосвязь остаточных напряжений с износостойкостью твёрдого сплава.

Регистрация профилей дифракционных линий проводилась по точкам способом набора заданного числа импульсов с ионизационной регистратурой. Положение максимума составляющей  $K_\alpha$  определялось методом Речингера Куколя. Величину остаточных напряжений определяли по формуле:

$$\sigma_{op} = \frac{E}{1 + \mu} \cdot \frac{d_\psi - d_\perp}{d_{cp} \sin^2 \psi}, \quad (4.21)$$

где  $E$  – модуль нормальной упругости;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $d_\psi$ ,  $d_\perp$  – межплоскостные расстояния, измеренные под углом и по нормали к поверхности образца;  $d_{cp}$  – среднее значение межплоскостных расстояний;  $\psi$  – угол между нормалью к поверхности образца и нормалью к отражающим плоскостям.

Для расчетов напряжений приняты макроскопические значения модулей упругости и коэффициента Пуассона:  $TiC - E = 460$  ГПа;  $\mu = 0,17$ ;  $Ni - E = 210$  ГПа;  $\mu = 30$  (ТН20);  $(TiW)C - E = 320$  ГПа;  $\mu = 0,14$ ;  $WC - E = 720$  ГПа;  $\mu = 0,22$  (Т15К6) [54].

Тогда значения упругих постоянных  $\frac{E}{1+\mu}$ , принятые при расчетах для соответствующих фаз, составляют:  $TiC$  – 390 ГПа, цементирующей фазы на основе никеля – 160 ГПа (ТН20),  $(TiW)C$  – 280 ГПа,  $WC$  – 590 ГПа (Т15К6). В безвольфрамовом твердом сплаве ТН20 снимали дифракционные линии (420)  $TiC$  и (311)  $Ni$ , а в сплаве Т15К6 линии (112)  $WC$  и (331)  $(TiW)C$ .

Теоретическая погрешность в определении напряжений для карбидов вольфрама составляла  $\pm 0,04 \dots 0,06$  ГПа, карбидов титана и цементирующей фазы на основе никеля  $\pm 0,03 \dots 0,04$  ГПа. Действительная погрешность, благодаря применению « $\sin^2 \psi$  -метода», оказывается меньше.

Твёрдосплавные пластинки из одной партии перед рентгеноструктурным анализом были предварительно отсортированы по одинаковой термо-э.д.с., и для дальнейших экспериментов выбирались образцы с её отклонениями не более чем  $\pm 0,5$  %. Предварительный отбор пластин по термо-э.д.с. способствовал тому, что разница в значениях остаточных напряжений в исходном состоянии находилась на уровне погрешности измерения.

Пластины сплава ТН20 сортировались также по количеству и дисперсности цементирующей фазы  $Ni$ ; из исследований исключались пластины с крупнокристаллической фракцией никелевой фазы, а также нарушенным соотношением интенсивности её дифракционных линий (111) и (200), которые в процессе рентгенографирования имеют наибольшую интенсивность по сравнению с другими дифракционными линиями.

С целью уточнения механизма формирования остаточных напряжений в безвольфрамовом твёрдом сплаве и выяснения взаимосвязи между составляющими суммарных ориентированных напряжений и износостойкостью твердого сплава было выполнено их разделение на макро  $\sigma_1$  и межфазные микронапряжения  $\sigma_2$  в соответствующих фазах. Разделение суммарных ориентированных напряжений (деформаций) на макро и межфазные микросоставляющие выполнялось путём вытравливания цементирующей фазы с поверхности сплава и последующем рентгенографировании.

Для сравнения полученных результатов производилось разделение суммарных остаточных напряжений с помощью модельного метода, разработанного в НТУ «ХПИ» [6].

Значения  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  во всех фазах гетерофазного сплава определяются путем решения системы линейных уравнений:

$$\sigma_1 + \sigma_2' = \sigma_{op}' \quad (4.22)$$

$$\sigma_1 + \sigma_2'' = \sigma_{op}'' \quad (4.23)$$

$$\sigma_1 + \sigma_2^n = \sigma_{op}^n \quad (4.24)$$

$$\sigma_2' v' + \sigma_2'' v'' + \dots + \sigma_2^n v^n = 0, \quad (4.25)$$

где  $\sigma_1$  – макронапряжения в поверхностном слое;  $\sigma_2' \dots \sigma_2^n$  – межфазные микронапряжения в каждой из фаз сплава;  $\sigma_{op}' \dots \sigma_{op}^n$  – суммарные (общие) ориентированные напряжения, измеренные по каждой из фаз;  $v' \dots v^n$  – объемная концентрация фаз.

Для установления взаимосвязи остаточных напряжений с эксплуатационными показателями обработанной поверхности проводились стойкостные испытания инструментов, обработанных в соответствующих условиях АИШ. Эксперименты проводились на токарно-винторезном станке 16К20 при точении пластинами из Т15К6 сырой стали 45 с  $HB = 170$  ( $V = 3,25$  м/с;  $S = 0,14$  мм/об;  $t = 0,2$  мм) и пластинами ТН20 стали ХВСГ ( $V = 3,25$  м/с;  $S = 0,075$  мм/об;  $t = 0,25$  мм) без охлаждения.

Резцы имели следующие геометрические параметры:  $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 10^\circ$ ,  $\alpha_1 = 12^\circ$ ,  $\varphi = 45^\circ$ ,  $\varphi_1 = 15^\circ$ ,  $\lambda = 0$ . За критерий затупления был принят износ по задней поверхности  $h_z = 0,45$  мм, который измерялся непосредственно на станке с помощью микроскопа Мир-2.

Установлено, что в поверхностном слое образцов из сплава Т15К6 формируются сжимающие остаточные напряжения, ориентированные в плоскости обработанной поверхности. В связи с тем, что при шлифовании имеет место неоднородная пластическая и термопластическая деформация по глубине, вызванная взаимодействием усилий резания и градиента температур, можно отметить, что механизм их формирования – макроскопический; при этом глубина распространения макронапряженного состояния обусловлена химико-механическими свойствами сплава и не превышает 100 мкм.

Сжимающий характер остаточных напряжений при всех режимах АИШ указывает, как уже отмечалось, на превалирующее влияние силового воздействия в исследованных условиях.

Следует иметь в виду, что измеренные ориентированные остаточные напряжения в фазах карбида вольфрама и титана имеют различные значения. И поскольку макронапряженное состояние поверхностного слоя в целом можно считать одинаковым, то, следовательно, существуют межфазные микронапряжения, которые приносят свой различный вклад в ориентированные суммарные остаточные напряжения. Понятно, что это проявление связано с неодинаковыми теплофизическими и прочностными свойствами фаз. Следует отметить, что, когда преобладает механическое воздействие (силовой фактор), межфазные остаточные микронапряжения распределяются в соответствии с прочностными свойствами фаз [56].

Таким образом, при алмазно-искровом шлифовании твёрдого сплава Т15К6 достигаемая высокая производительность обработки сопровождается благоприятным состоянием поверхностного слоя – в нём возникают сжимающие остаточные напряжения, на формирование которых превалирующее влияние оказывает силовой фактор.

#### **4.7. Силовое (глубинное) электроалмазное шлифование**

Алмазное электрохимическое шлифование (АЭХШ) является разновидностью электроабразивного шлифования (ЭАШ), относящегося к интегрированным методам обработки (ИМО) токопроводящих материалов (сталей, твердых сплавов и др.) и являющегося значительным резервом повышения эффективности материалобрабатывающего производства (повышения производительности и, соответственно, снижения себестоимости обработки) и качества изделий. Интегрированные методы обработки относятся к особому классу технологических процессов, вызванных к жизни все повышающимися требованиями именно к эффективности производства и качеству изделий. Совершенствование конструкций машин и существенные успехи материаловедения в создании высокопрочных, высокотвердых, жаростойких и т.п. материалов поставили перед технологами задачи, которые с помощью традиционных методов обработки резанием решаются либо очень сложно и малоэффективно, либо решить их традиционными методами вообще нельзя. В такой ситуации решение возникающих проблем может быть эффективным при использовании ИМО, которые базируются на более полной реализации режущих свойств инструмента. Они на современном этапе развития машиностроения получают все более широкое развитие и распространение, совершенствуется соответствующее оборудование и технологические процессы с использованием ИМО, относящиеся к интегрированным технологическим процессам, которые при обработке резанием позволяют формировать зону деформации и разрушения срезаемого слоя, совмещая протекающие одновременно дополнительные воздействия (механическое, электрохимическое, электроконтактное, электроэрозионное) на обрабатываемый материал и инструмент, и, тем самым, обеспечивать более высокую производительность обработки и качество обработанной поверхности.

В последние годы видное место среди комбинированных методов обработки различных материалов, особенно инструментальных (твердых сплавов и быстрорежущих сталей), занимает АЭХШ, основной особенностью которого является использование в качестве инструментов алмазных кругов на токопроводящих связках, например, металлических. Эффект при АЭХШ достигается за счет использования дополнительного электро-физико-химического (ЭФК) воздействия на обрабатываемый материал и инструмент - шлифовальный круг. В большом количестве публикаций в зарубежных и

отечественных периодических изданиях также в нескольких монографиях отражены результаты исследований электроалмазного шлифования и практический опыт его применения. Анализ имеющихся материалов показывает, что потенциальные возможности такого сложного интегрированного процесса механической обработки, как ЭАШ, реализуются еще далеко не полностью в связи с недостаточно четким пониманием сущности физико-химико-механических процессов, сопровождающих при этом шлифовании процесс разрушения срезаемого слоя и формирования как соответствующих параметров качества обработанной поверхности, так и поддержания в процессе обработки высокой режущей способности алмазосодержащего слоя. При этом наблюдается относительно низкий удельный расход (износ) шлифовального инструмента (круга), что очень часто обуславливает относительно низкую себестоимость процесса обработки детали, а, следовательно, и изделия в целом.

#### **4.7.1. Общие сведения о процессе АЭХШ. Краткая характеристика процесса**

Эффективность применения АЭХШ можно оценивать с двух позиций. Во-первых, введение в зону контакта круга с заготовкой электро-физико-химического воздействия позволяет повысить производительность обработки в условиях уменьшения нагрузки на абразивные зерна или создать возможности дополнительного съема материала при ее сохранении. Во-вторых, эффекты, возникающие от дополнительного воздействия электрической энергии, благоприятно сказываются на поддержании высокой режущей способности круга.

Наиболее широко распространена схема жесткого АЭХШ (рис. 4.83), где шлифовальный круг и обрабатываемая деталь, закрепленная в специальном приспособлении на столе станка, подключаются к источнику постоянного тока. В межэлектродный зазор (рис. 4.84) в процессе работы подается электролит.

Большинство исследователей [63, 64 и др.] рекомендуют применять метод АЭХШ на прямой полярности, когда деталь подключается к положительному полюсу источника постоянного тока, а шлифовальный круг – к отрицательному. *Алмазное электрохимическое шлифование* на прямой полярности в технической литературе часто называют *электроалмазным шлифованием*. Практически его реализуют, как правило, в условиях, исключающих появление эрозии, вследствие чего основной недостаток применения обычного абразивного (алмазного) инструмента на металлических связках («засаливание») все-таки может иметь место, хотя и после более продолжительной работы, чем без подключения источника постоянного тока по такой схеме. Для устранения этого недостатка можно вести процесс на обратной полярности, осуществлять так называемое «*алмазно-катодное шлифование*».

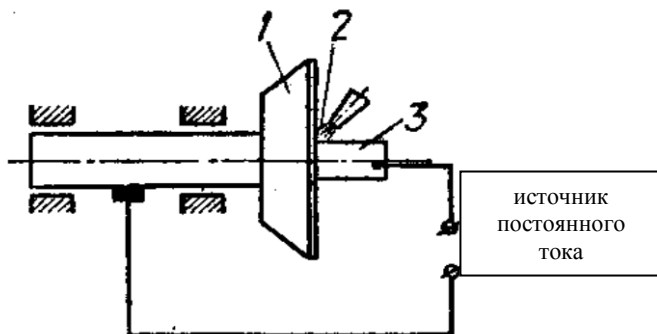


Рисунок 4.83 – Типовая схема электроалмазного шлифования:  
*a* – электроабразивная обработка на прямую (деталь – анод, круг – катод)  
 и обратную (деталь – катод, круг – анод) полярности;  
 1 – алмазный круг на токопроводящей связке;  
 2 – электродит; 3 – обрабатываемая деталь

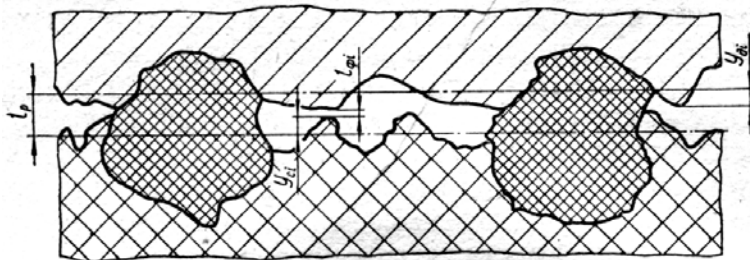


Рисунок 4.84 – Схематическое изображение контактирующих профилей при АЭШ:

$l_p$  — расстояние между средними линиями профилей детали и связки круга;  
 $y_{di}$  и  $y_{ci}$  - отклонения от средней линии точек профиля поверхности детали и  
 связки круга соответственно;  $l_{fi}$  — фактическая величина зазора

В процессе работы по этой схеме связка электролитически растворяется, удаляя с поверхности круга часть связки и «прилипшие» продукты разрушения срезаемого слоя (стружку), и обнажая, таким образом, абразивные (алмазные) зерна. Между связкой круга и обрабатываемой поверхностью образуется увеличенный зазор  $l_p$  (рис. 4.84), что улучшает условия резания алмазными зернами. От электроалмазной обработки (электроалмазного шлифования на прямой полярности) этот метод отличается тем, что в процессе работы электролитически растворяется рабочая

поверхность круга, а не детали; обрабатываемый материал преимущественно снимается за счет резания зернами. В целом этот метод можно охарактеризовать как *способ совмещения во времени двух происходящих в зоне обработки детали процессов*: абразивной (алмазной) обработки и электролитической правки круга.

В общем случае электроалмазное шлифование не только удачно сочетает в себе достоинства алмазного шлифования, электрохимической и электроэрозионной обработок, но и учитывает проявление эффектов их взаимодействия, способствующих интенсификации удаления припуска [61, 62].

К настоящему времени представление о сущности процесса АЭХШ значительно углубилось, раскрылись его новые стороны и возможности. Наиболее принципиальны следующие моменты.

*Электроалмазное шлифование – интегрированный метод обработки, основанный на управляемом микроразрушении обрабатываемого материала в электрическом поле при одновременном действии алмазных зерен и электро-физико-химического воздействия. Токпроводящая связка шлифовального круга и обрабатываемая деталь – это два электрода в электрической цепи.* В зазоре между ними интегрируются все явления, порождающие последовательные акты микроразрушения обрабатываемого материала и изменение рабочей поверхности круга: микрорезание алмазными зернами, электрохимическое растворение, электроэрозия и контактное оплавление (рис. 4.85) [61, 62].

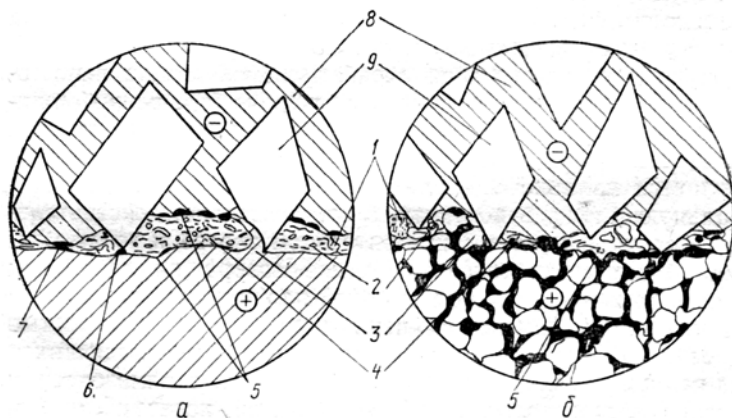


Рисунок 4.85 – Схема зоны контакта «круг - обрабатываемая деталь» для пластичного (а) и хрупкого (б) материалов:

- 1 – эрозионный разряд; 2 – пузырьки газа и продукты диспергирования;
- 3 – стружка; 4 – электролит; 5 – следы электрофизического воздействия;
- 6 – продукты анодного растворения; 7 – зона электрического контакта;
- 8 – связка круга; 9 – алмазное зерно

Характер явлений, порождаемых протеканием электрического тока через межэлектродный зазор, во многом зависит от свойств материалов (связки круга и обрабатываемого, например, хрупкий или пластичный) и, соответственно, характера контактирующих поверхностей. Из этого следует, что рабочая поверхность алмазного круга (количество, характеристика и свойства его зерен, свойства связки и т.п.) должны отвечать условиям эффективности алмазного шлифования и удовлетворять требованиям электрофизических и электрохимических процессов. Важную роль также играют свойства среды (электролита), заполняющей межэлектродный промежуток: состав электролита, его температура, насыщение электролита паром и газами, наличие в нем продуктов шлифования и износа круга, продуктов химических реакций и т.п.

Одной из основных особенностей электроалмазного шлифования следует считать нестабильность электрических процессов в межэлектродном зазоре. Даже при использовании источников постоянного тока неоднородный характер поверхности круга (электропроводная связка и алмазные зерна), значительные микронеровности поверхностей электродов (деталь и связка круга), колебание величины зазоров между связкой и деталью, периодическое возникновение и исчезновение мостиков контакта и устремляющаяся к связке образующаяся стружка определяют непостоянство электрического сопротивления межэлектродного зазора и, соответственно, величины общего тока. Она включает в себя: ток электролиза, ток кратковременных локальных коротких замыканий по мостикам контакта, ток электрических разрядов из-за пробоя межэлектродного зазора или разрыва мостиков связки вследствие вращения круга. Если к этому учесть отсутствие сплошной режущей кромки у алмазного круга, то становится ясным дискретный и нестабильный (импульсный) характер всех явлений в межэлектродном зазоре, влияющих на интенсивность съема материала и качество поверхностного слоя обрабатываемого изделия. Дифференцированный подход к изучению этих явлений позволяет более глубоко познать их закономерности и роль в общем процессе, называемом электроалмазным шлифованием. Будучи интегрированными в его рамках, факторы технологического воздействия формируют новый потенциал обработки.

Эффективность электроалмазного шлифования (показатели: высокая производительность, малый износ кругов (удельный расход), качество обработанной поверхности, экономичность) в значительной мере определяется динамическим состоянием (уровнем вибраций) элементов обрабатывающей системы (ОС), которое играет важную роль во всех процессах шлифования, а в рассматриваемом – в особенности, и в значительной мере зависит от принятой схемы шлифования (жесткого (рис. 4.83) или упругого (рис. 4.86)). Характер и уровень вибраций изменяют не только воздействие режущих алмазных зерен на обрабатываемый материал

и интенсивность их разрушения, но и (периодически) на величину межэлектродного зазора  $l_p$  (рис. 4.84), а, следовательно, и на действительные электрические параметры процесса. Происходящее при этом изменение взаимосвязи электро-физико-химических и механических явлений существенно сказывается на основных показателях АЭХШ – производительности процесса шлифования, износе круга, качестве обработанной поверхности, экономичности процесса обработки и др.

При шлифовании имеют место *вынужденные, собственные и автоколебания*. Вынужденные колебания возникают под действием внешних возмущающих сил и обуславливаются неуравновешенностью шлифовального круга, вращающихся частей станка, передач и опор. Частота вынужденных колебаний совпадает с частотой возмущающей силы (или кратна ей), а амплитуда зависит от ее величины и не зависит от режима шлифования.

Частота собственных колебаний системы определяется как

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c}{m}}, \text{ Гц}, \quad (4.26)$$

где  $c$  – жесткость системы;  $m$  – масса системы. Частота собственных колебаний шлифовальных станков и их узлов составляет 50-500 Гц. В большинстве случаев частоты, вызванные дисбалансом вращающихся деталей станка, оказываются ниже его собственных частот. Если же эти частоты попадают в один диапазон, то наблюдается резонанс. При этом значительно возрастают амплитуды колебаний.

Причиной автоколебаний, частота которых близка к одной из частот собственных колебаний менее жесткого узла системы, по мнению Г. Лурье и Е. Салье [65], являются релаксационные колебания трения: деталь увлекается шлифовальным кругом за счет трения, затем быстро отскакивает обратно, вновь увлекается, причем этот процесс постепенно нарастает. Повышение частоты автоколебаний при любом увеличении силы резания (силы прижима детали к кругу) может происходить вследствие того, что под действием силы прижима жесткость закрепленной на станке детали повышается.

Экспериментально установлено, что вибрации в обрабатываемой системе существенно влияют на основные показатели процесса и при электроалмазном шлифовании [70]. Так, биение круга (одна из основных причин возникновения вибраций в ОС) с амплитудой 150 мкм при обработке сплава ВК15 увеличивает производительность в 6 раз по сравнению со шлифованием с амплитудой 10 мкм. Однако при этом возрастает удельный расход алмазного инструмента (шлифовального круга) и качественно изменяется характер рельефа обработанной поверхности. Вид поверхности после обработки с большими биениями круга свидетельствует о перераспределении роли электро-физико-химических и механических факторов технологического влияния в удалении припуска и формировании

поверхностного слоя. Не случайно внимание некоторых исследователей [61] привлекает метод шлифования с постоянной силой прижима детали к кругу.

Такой принцип упругого шлифования можно реализовать с помощью различных конструктивных решений [61, 62 и др.]. Три основные наиболее часто встречающиеся схемы шлифования приведены на рис. 4.86.

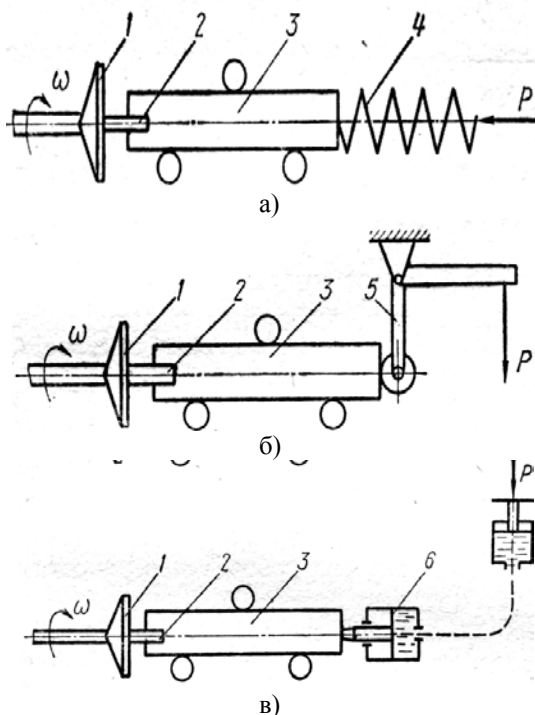


Рисунок 4.86 –Схемы упругого шлифования с помощью пружины (а), рычага (б) и гидравлического устройства (в):  
 1 – алмазный круг; 2 – образец; 3 – каретка;  
 4 – пружина; 5 – рычаг; 6 – гидросистема

При шлифовании по схемам рис. 4.86, а и б прижимное усилие  $P$  по мере съема припуска не остается постоянным. Для его стабилизации требуются специальные устройства ([71 и др.]), особенно в случае съема больших припусков. Но главное состоит в том, что эти схемы имеют различные амплитудно-частотные характеристики при одинаковых значениях нормальной силы, скорости круга и величины его биения.

Известно [61, 62 ], что схема жесткого шлифования (рис. 4.83) в значительно большей мере, чем схема упругого шлифования (рис. 4.86),

подвержена возникновению вибраций, т.е. изменению динамического состояния ОС. Следует обратить внимание на тот факт, именно динамическое состояние элементов ОС чаще всего является ограничивающим фактором повышения производительности обработки (шлифования), например, твердых сплавов как при многопроходном жестком АЭХШ (поперечная подача  $S_n = 0,05-0,1$  мм/дв. ход, продольная подача  $S_{пр} = 2-3$  м/мин), так и при упругом шлифовании с малыми (традиционно применяемыми) давлениями  $p = 2-6$  кгс/см<sup>2</sup>) с электрическими параметрами: напряжение  $U = 6-8$  В; плотность тока  $i = 60-100$  А/см<sup>2</sup>. Существенное повышение производительности процесса обработки (в 10 и более раз [61, 62]) при обеспечении требуемых параметров качества обработанной поверхности можно обеспечить путем применения так называемого *силового электроалмазного шлифования (жесткого глубинного)* ( $S_n = 0,3-1,0$  мм/дв. ход) и упругого с давлением  $p = 10-25$  кгс/см<sup>2</sup> [61, 62]). Вместе с тем, следует иметь ввиду, что при силовом электроалмазном шлифовании механизмы разрушения срезаемого слоя и формирования новой (обработанной) поверхности существенно отличаются от этих механизмов при многопроходном жестком АЭХШ и при упругом шлифовании с малыми давлениями. Это обстоятельство требует принципиально новых, по сравнению с традиционно применяемыми видами АЭХШ, подходов при определении (назначении) условий обработки: режимов резания, особенно электрических параметров, характеристик шлифовальных кругов и т.п.

#### **4.7.2. Физические особенности силового электроалмазного шлифования**

Возможность применения больших нормальных давлений ( $p = 10-25$  кгс/см<sup>2</sup>) и глубинного шлифования алмазными кругами открывает широкие перспективы в области освоения электроалмазной обработки, особенно в инструментальном производстве. Эти методы позволяют обеспечить эффективный съем больших припусков за один проход как при обработке быстрорежущих сталей и твердых сплавов, так и при обработке твердых сплавов совместно со сталью, при стабильном обеспечении высокого качества обработанных поверхностей и режущих кромок лезвия.

##### **4.7.2.1. Рабочий зазор**

Межэлектродный зазор в условиях шлифования алмазными кругами с большими нормальными давлениями характеризуется рядом особенностей:

– существенно уменьшается расстояние между токопроводящими поверхностями связки круга и обрабатываемого материала. Считают, что в условиях обычного (традиционного) электрохимического абразивного шлифования величины межэлектродных зазоров составляют 0,03-0,04 мм [75]. При силовом шлифовании высоты  $y_{di}$  и  $y_{ci}$  неровностей на стыках такого зазора становятся соизмеримыми с расстоянием  $l_p$  между средними линиями

контактирующих профилей (рис. 4.84). Под этим понимается профиль участков металлической связки (исключая зерна алмаза) и микропрофиль обрабатываемой поверхности. Вследствие биений круга и вибраций в ОС расстояние между средними линиями профилей и отдельными микронеровностями периодически изменяется. Значения межэлектродных зазоров могут изменяться от наибольшего предельного значения до нуля;

– при больших нормальных давлениях величина межэлектродного зазора устанавливается столь незначительной (в среднем 10-20 мкм), что при непрерывном вращении круга сплошность потока электролита в малом зазоре многократно нарушается из-за: наличия режущих зерен, внедряющихся в обрабатываемый материал; срезания стружки; наличия неровностей связки и обрабатываемой поверхности. Это обуславливает интенсивное перемешивание электролита и обновление его в слоях, примыкающих к обрабатываемой поверхности.

– при столь малых зазорах между развитой поверхностью связки и неровностями детали вероятно возникновение режима поверхностной турбулентности. Линейные завихрения жидкости порождаются постоянным обновлением обработанной поверхности, связанным с разрушением шлифуемого материала и отделением многочисленных микростружек. В связи с турбулентностью потока возникают иные условия массопереноса. В этих условиях должны быть велики гидравлические потери на трение. Они зависят от отношения высоты микронеровностей на рабочей поверхности круга и обрабатываемой детали к величине зазора между ними. Так как эта величина может быть весьма малой (до 0), то, естественно, отношение может значительно превышать 1, т.е. указанные потери могут многократно возрастать. Значительные различия в величине локальных зазоров влияют на распределение плотности тока между различными участками номинальной площади контакта круга с деталью. Наибольшая действительная плотность тока будет там, где расстояние между связкой и деталью наименьшее. В этом месте реализуется максимальная скорость электрохимического съема материала. Величина же съема по профилю неравномерна. Если бы катод (круг) не вращался, а только поступательно двигался в направлении обрабатываемой поверхности, то действительная плотность тока со временем выровнялась бы, так как неровности поверхности детали сформировались бы в соответствии с неровностями на поверхности катода (связки круга). В связи с этим возникает необходимость рассмотрения вопроса о равновесности зазора, который стабилизируется при равенстве скоростей электрохимического растворения анода и подачи катода. Поэтому рассматриваемый процесс ЭАХШ всегда реализуется в условиях неравновесного зазора. Во всяком случае в связи с «принудительным» (абразивным) удалением объемов обрабатываемого материала не может происходить саморегулирование электрохимического процесса, как это

наблюдается при ЭХО. Малая величина локальных межэлектродных зазоров при больших нормальных давлениях и постоянное абразивное обновление поверхности (депассивация) в сочетании с высокой локальной плотностью тока приводят к возникновению зазоров, меньших равновесных;

– в условиях малых межэлектродных зазоров своеобразное воздействие на ионы, а, следовательно, и на плотность тока, оказывают физические факторы, обуславливающие их перемещение в электролите: диффузия, миграция, конвекция, магнитное поле. Кроме того, постоянное обновление электролита при шлифовании с  $p > 20$  кгс/см<sup>2</sup>, отличается от процесса обновления электролита при шлифовании с меньшими нормальными давлениями, поскольку его объем в межэлектродном зазоре меньше, а объем продуктов шлифования, размещаемых в межзеренном пространстве, больше. Результирующее значение действительной плотности тока зависит от того, насколько быстро обновляется электролит в межэлектродном зазоре и какова действительная величина локального зазора;

– при электрохимическом шлифовании с большими нормальными давлениями, когда устанавливаются малые значения межэлектродного зазора (10-20 мкм), электрическое поле в пределах пятна контакта сильно зависит от величины локальных зазоров, определяющихся во многом неровностями связки и обрабатываемой поверхности, а также количества в нем продуктов разрушения как обрабатываемой поверхности, так и рабочей поверхности шлифовального круга.

#### **4.7.2.2. Гидродинамика электролита**

*Электролит – важнейший элемент любого метода ЭХО. В рассматриваемом случае он играет роль электропроводящего звена в электрической цепи и обеспечивает требуемое протекание анодного и катодного процессов, поддержание температуры в рабочем зазоре, транспортировку продуктов электродных и вторичных химических реакций, а также удаление стружки и продуктов износа алмазного круга.*

Преимущественно электролиты образуются путем растворения в воде солей, щелочей, кислот, которые диссоциируют там на ионы. Приложенная к электролиту, находящемуся в зазоре, разность потенциалов приводит ионы в движение, что сопровождается возникновением в цепи электрического тока, обуславливающего перенос вещества между кругом и деталью. На прямой полярности под действием электрического поля положительно заряженные ионы металла отводятся от поверхности детали (анода), а отрицательно заряженные устремляются к ней.

Происходящее в процессе обработки перемешивание электролита насыщает или обедняет приэлектродные пространства, что влияет на диффузию ионов, а, значит, и на скорость анодного растворения либо обрабатываемой поверхности (при прямой полярности), либо связки круга (при обратной полярности). Например, в условиях электрохимической

размерной обработки (ЭХРО) скорость движения электролита связывают с толщиной диффузионного слоя у поверхности анода, и, как следствие, с точностью обработки. Когда скорость реакции определяется скоростью диффузии, достигается значительно меньшая плотность тока, чем при прокачке электролита [77]. Но поскольку скорость течения электролита по зазору распределяется неравномерно, то возникает и неравномерное распределение тока, приводящее к неравномерному локальному съему. Однако, как указывается в [78], существует такая область скорости протекания, в пределах которой скорость растворения уже не зависит от скорости электролита. Она *называется областью электрохимической кинетики*. При постоянном потенциале превышение этой оптимальной скорости протекания не влияет на скорость растворения. В то же время возможны такие местные снижения скорости электролита, при которых на соответствующих участках анодной поверхности растворение идет по законам диффузионной кинетики, обуславливающей уменьшение скорости растворения обрабатываемого материала.

Со скоростью движения электролита связаны еще два важных обстоятельства. Протекание электрического тока через электролит-проводник нагревает его. По данным [78], нагрев электролита до 20-60°C не влияет на величину удельного съема металла и анодного выхода по току. Вместе с тем, известно [79], что при нагревании электролита изменяется его вязкость, растет электропроводность, падает перенапряжение на электродах и меняется анодная поляризационная характеристика процесса, а, следовательно, уменьшаются энергозатраты на протекание анодных процессов и увеличиваются токи диффузии. Следует иметь в виду, что при определенных условиях может иметь место даже кипение электролита. В этом случае возникает неравномерное распределение тока и, соответственно, неравномерный по зазору съем.

В общем случае принято считать, что при обычном электроалмазном шлифовании электролит движется со скоростью вращения круга. Под действием силы тяжести струя электролита перекрывает, как правило, всю зону обработки, по крайней мере, участки, прилегающие к контактирующим поверхностям круга и детали. Вращающаяся с высокой скоростью рабочая поверхность круга смачивается, захватывает межзеренными углублениями определенный объем электролита, обеспечивая, тем самым, заполнение межэлектродного зазора и быстрое (со скоростью  $V = 20-40$  м/с) перемещение электролита относительно поверхности детали.

При шлифовании с большими нормальными давлениями теоретически возможны два случая – толщина увлекаемого кругом слоя меньше или больше величины межэлектродного зазора. Реализация первого случая возможна, поскольку центробежные силы, действующие на элементарный объем электролита, сбрасывают его с поверхности круга в радиальном

направлении. Нарушение сплошности перемещающегося в зазоре электролита, появление пространств, заполненных газами, приводят к тому, что на некоторых участках анодной поверхности на короткое время образуется малоподвижный слой электролита, в котором снижаются скорости диффузии и обновления реагентов в области реакции [80], а также создаются предпосылки для электрического разряда по газовому мостику. Во втором случае весь объем межэлектродного зазора заполняется электролитом, скорость движения которого относительно обрабатываемой поверхности детали значительно больше, чем относительно рабочей поверхности круга, что обуславливает неламинарность потока, а, следовательно, его турбулентность. Этому может способствовать и то, что падающая струя при встрече с быстро перемещающейся поверхностью круга разбивается и часть ее отбрасывается центробежной силой еще до того, как рассматриваемый элементарный участок поверхности круга войдет в контакт с обрабатываемым материалом, а также захват рабочей поверхностью круга некоторых объемов воздуха и доставки его в зону шлифования. В результате не все начальное (на входе) сечение рабочего зазора заполняется электролитом. В этих условиях важную роль играет степень смачиваемости электролитом поверхности круга и особенно обрабатываемой поверхности детали.

Если бы даже поверхности электродов были более гладкими, то при малых значениях зазора уже в силу того, что скорость поверхности круга примерно на два порядка выше скорости поверхности детали, должен проявляться турбулентный характер движения электролита.

В межэлектродном зазоре на элементарный объем электролита, контактирующий с рабочей поверхностью круга, в окрестностях режущего зерна кроме центробежной силы действует и большое количество элементарных объемов срезаемой стружки, формирующиеся в связи с неплотностью (развитостью) передних поверхностей режущих зерен и движущихся с различными скоростями (рис. 4.87). И, наконец, гидродинамические параметры межэлектродной среды, прежде всего скорость, могут изменяться из-за импульсных разрядов, возникающих в малом межэлектродном зазоре (см. рис. 4.85). В результате таких колебаний при ЭХРО, по мнению [81], выравнивается съем металла по длине рабочей части зазора по сравнению с обработкой на постоянном токе без электрических пробоев.

Таким образом, скорость движения элементарного объема электролита в межэлектродном зазоре – результат сложного взаимодействия многих сил: собственного веса; центробежной; воздействия снимаемой стружки; силы, зависящей от гидродинамического давления; силы, порожденной колебаниями среды из-за электрических разрядов, и др.

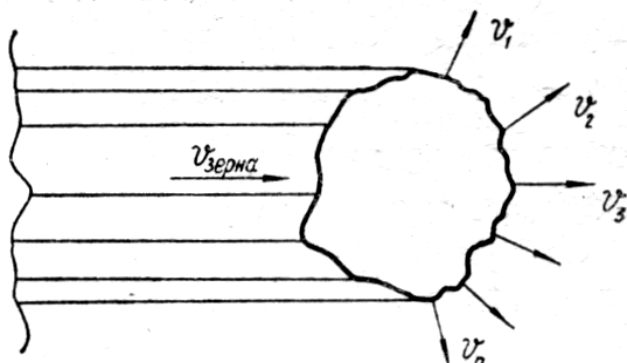


Рисунок 4.87 – Характер изменения скоростей элементарных объемов стружки на режущей кромке алмазного зерна

Эти силы приводят к интенсивному перемешиванию электролита, что при шлифовании с большими нормальными давлениями приобретает особое значение, когда межэлектродный зазор существенно уменьшается и по существу приближается к значениям толщин приэлектродных слоев.

#### 4.7.2.3. Кинетика растворения твердых сплавов и сталей

В данном параграфе рассмотрены некоторые особенности кинетики растворения твердых сплавов и сталей в условиях высоких нормальных давлений [82, 83].

Вклад электрохимической компоненты в общий сьем припуска определяется прежде всего скоростью анодного растворения обрабатываемого металла. Последняя зависит от плотности поляризующего тока.

Выход по току, обусловленный законом Фарадея, обычно может не достигать 100%. При погружении металлов в водные и неводные растворы возникают двойные слои вследствие неодинакового стремления положительно и отрицательно заряженных компонентов покинуть ту или иную фазу. Двойные электрические слои имеют обычно диффузионный характер, причем объемная плотность зарядов постепенно понижается при удалении от границы раздела, а разноименные частицы двойного слоя располагаются по обе стороны от этой границы.

При шлифовании алмазным кругом возникает принудительное движение электролита относительно анодной поверхности, что ставит ионы в условия конвективного переноса, при котором они либо покидают двойной слой и переходят в область электронейтрального раствора, либо входят в двойной слой извне. В нашем случае идентичность этого процесса во всех

точках обрабатываемой (анодной) поверхности отсутствует, так как поток электролита не везде сплошной, а снимаемая стружка создает локальные перепады давления и различные локальные скорости протекания. Этим самым создаются условия для конвективного обмена различной массовости. В определенных условиях возникает чисто химическое воздействие на внешней границе двойного слоя. Нерастворимые продукты реакции образуют на поверхности слой с односторонней проводимостью. Наступает динамическое равновесие, характерное для процесса растворения.

Авторы [83] выделяют три фактора электрохимического процесса:

- 1) диффузионное растворение металла с образованием равновесного двойного электрического слоя;
- 2) движение ионов растворителя под действием внешнего электростатического поля (электроосмос);
- 3) химическая реакция на внешней границе слоя с образованием таких конечных продуктов реакции, как оксидные пленки, нерастворимые гидраты, газы и др. Последние определяют растворение металла, активирование или пассивирование анодной поверхности.

Пассивирующие слои существенно влияют на скорость электродных процессов и могут достигать на многих металлах значительной толщины. Способность пассивироваться зависит от состава сплава, природы металла и применяемого электролита [84, 85]. Кроме того, установлено, что пассивация облегчается при накоплении в приэлектродном слое продуктов растворения металла [85].

Известно [86, 87, 88], что поляризационные кривые сплавов ВК (без специальной депассивации анодной поверхности, в том числе алмазными зернами) имеют участки активного растворения, пассивации и перепассивации. Поляризационные кривые для сплавов группы ТК имеют аналогичный характер [89], хотя в некоторых случаях наблюдается более плавный рост плотности тока, менее выраженные участки пассивации и отсутствие участка транспассивного состояния [89]. Полагают, что скорость растворения сплава зависит от скорости растворения каждого из компонента [90, 91]. В простых электролитах ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{NaOH}$ ,  $\text{NaNO}_3$ ) избирательно растворяется одна из фаз твердого сплава. По-видимому, в растворах  $\text{NaOH}$  концентрации 100 г/л преимущественно растворяется карбид вольфрама. Это подтверждается смещением анодного потенциала в положительную сторону с переходом от ВК8 к ВК15, т.е. с уменьшением карбида вольфрама. Кобальт растворяется в растворах хлористого и азотнокислого натрия, при этом в пассивирующем растворе  $\text{NaNO}_3$  возрастает потенциал анода. В электролите 50-100 г/л  $\text{NaNO}_3$  и 100 г/л  $\text{NaOH}$  может достигаться такое соотношение компонентов, когда равномерно растворяются обе фазы, увеличивается скорость растворения сплава и улучшается качество обработки.

Явления, рассмотренные для ЭХРО, неидентичны тем, которые

наблюдаются при АЭХШ. Главная причина – резание алмазными зернами, в результате чего удаляются не только пассивирующие слои, но и нижележащие объемы обрабатываемого материала. Вновь образуемая поверхность представляется некоторое время ювенильной, однако уже через  $\tau \approx 2 \cdot 10^{-3}$  с на ней вновь возникает пассивирующий слой. Результирующее проявление зависит от той частоты, с которой обновляются элементарные участки пассивируемой поверхности анода. Повышение нормального давления сверх 10-12 кгс/см<sup>2</sup> включает в работу даже те зерна на рабочей поверхности шлифовального круга, которые при меньших давлениях обычно в работе не участвуют.

Изучая напряжения, плотность тока и анодный потенциал сплава ВК6 без механической депассивации и с ней, установили, что уже на малых давлениях (около 0,2 кгс/см<sup>2</sup>) в экспериментальных кривых плотности тока и анодного потенциала наблюдаются различия. Плотность тока значительно возрастает (в 1,9-2,3 раза при изменении  $p$  от 2 до 8 кгс/см<sup>2</sup>) и ее максимум сдвинут в сторону более высоких значений потенциала. С повышением давления участок кривой для пассивного состояния еще более сглаживается.

При упругом шлифовании с нормальными давлениями более 16 кгс/см<sup>2</sup> ток в течение длительного времени остается практически постоянным. Это свидетельствует об отсутствии условий, необходимых для образования оксидной пленки такой толщины, которая приводила бы к уменьшению плотности тока. Скорость анодного растворения максимальна и в электромеханическом процессе участвует непрерывно обновляющаяся поверхность, что исключает трудности, характерные для низких нормальных давлений.

При обработке с нормальными давлениями 10-12 кгс/см<sup>2</sup> наблюдается плавный рост плотности тока с увеличением потенциала, что указывает на отсутствие аномалий в протекании электрохимического процесса. Большая прочность сплава ВК8 приводит к тому, что в него алмазные зерна внедряются на меньшую глубину, чем в сплав Т15К6 в идентичных условиях. Поскольку межэлектродный зазор у ВК8 больше, его сопротивление выше и соответственно ток в цепи у ВК8 меньше, чем у Т15К6 (рис. 4.88).

Составы применяемых электролитов сильно влияют на протекание анодных процессов [88, 90, 91]. Интенсивное обновление растворяемой поверхности в условиях шлифования с большими нормальными давлениями [61, 62] позволяет в большей степени проявиться химической активности электролитов. Появляется возможность подбирать такие составы электролитов, которые усиленно растворяют обрабатываемый материал. По существу, устраняется необходимость включать в электролит составляющие для химической депассивации анодной поверхности.

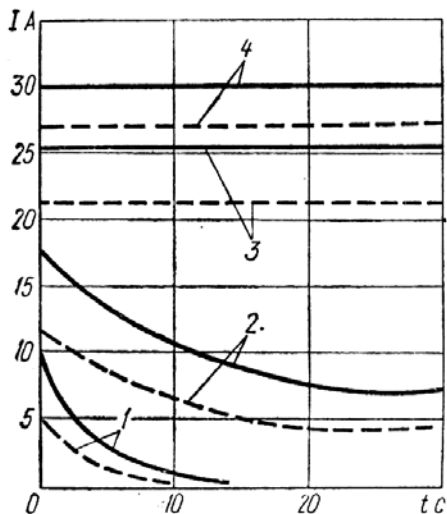


Рисунок 4.88 – Кривые зависимости тока от времени обработки для ВК8 (---) и Т15К6 (—) при  $p$  кгс/см<sup>2</sup>:  
 1 –  $p = 1$ ; 2 –  $p = 3$ ; 3 –  $p = 16$ ; 4 –  $p = 20$ ;  $v = 20$  м/с;  $S_{np} = 0$ ;  $U_p = 4,5$ В;  
 круг АЧК 150x10x3x32 АСБ 100/80 МВ1-П-150%

#### 4.7.2.4. Действительная плотность тока и рабочее напряжение

В условиях АЭХШ действительная величина зазора между электропроводной связкой круга и обрабатываемым материалом зависит от нормального давления (поперечной подачи), скорости круга, продольной подачи, зернистости и концентрации алмазов. Поэтому изменение зазора влияет (вместе с заполнением зазора стружкой, испарением электролита и газообразованием) на сопротивление межэлектродного участка электрической цепи [77, 92]. Таким образом, между характеристикой круга, режимами шлифования и электрическими параметрами процесса (действительной плотностью и напряжением тока) возникает сложная взаимозависимость.

Для ЭХРО номинальная плотность тока  $i_n$  определяется отношением силы тока  $I$  (А) к номинальной площади  $F_n$  (мм<sup>2</sup>) контакта электродов:

$$i_n = \frac{I}{F_n} \cdot 10^2, \text{ А/см}^2. \quad (4.27)$$

При АЭХШ такая оценка соответствует лишь номинальным значениям плотности тока, так как у одного из электродов (алмазного круга) площадь

поверхности, соответствующая электропроводной связке (электрохимически активная площадь), отличается от площади его рабочей поверхности. Поэтому в формулу для определения действительной плотности тока  $i_d$  вместо номинальной площади  $F_n$  (для схемы шлифования призматической обрабатываемой детали высотой  $h$  торцом чашечного круга  $F_n = bh$ , где  $b$  – ширина алмазосносного слоя) целесообразно ввести действительную площадь контакта  $F_d$ , учитывающую наличие в объеме алмазосносного слоя неэлектропроводных элементов (алмазов). При этом площадь будет зависеть от размеров алмазных зерен (зернистости) и их количества на поверхности круга, т.е. концентрации алмазов. Так как алмазосносный слой кругов, например, на металлической связке МВ1 состоит из неэлектропроводных алмазных зерен (изоляторов) и легированного медноалюминиевоцинкового сплава без наполнителя [93], то электрохимически активную (действительную) площадь можно представить как разность между номинальной площадью контакта и площадью на поверхности круга, занимаемой алмазными зернами  $F_{a.a}$ :

$$F_d = F_n - F_{a.a}, \text{ мм}^2. \quad (4.28)$$

Тогда действительная плотность тока при условии отсутствия эрозионных разрядов и переключения зазора электропроводными продуктами диспергирования (снимаемой стружкой):

$$i_n = \frac{I}{F_n} \cdot 10^2, \text{ А/см}^2. \quad (4.29)$$

Именно величина  $i_d$  характеризует возможную максимальную скорость анодного растворения обрабатываемого материала в промежутках между эрозионными разрядами и в те моменты, когда сопротивление в месте контакта снимаемой стружки и поверхности электродов больше, чем сопротивление электролита в зазоре. Практически именно  $i_d$  определяет долю материала, удаляемого в результате электрохимического воздействия, так как в моменты интенсивного протекания эрозионного и электроконтактного процессов скорость анодного растворения пренебрежимо мала из-за шунтирования зазора эрозионными и дуговыми разрядами или снимаемой стружкой.

Площадь, занимаемую алмазными зернами, в сечении, которое характеризует уровень (поверхность) связки в пределах номинальной площади контакта, можно определить по формуле

$$F_{a.z} = F_n \sum_{j=1}^{n_f} F_{e.zj}, \quad (4.30)$$

где  $F_{e.z}$  – площадь, занимаемая единичным зерном в требуемом сечении,  $\text{мм}^2$ ;  $n_f$  – количество алмазных зерен в  $1 \text{ мм}^2$  поверхности круга.

Если  $F_{ез}$  определять по 4.31, где  $d_{с.п.}$  – средний кубический взвешенный размер зерен данной зернистости (табл. 4.8), т. е. средний размер всей совокупности зерен порошка данной зернистости, мкм;  $k$  – коэффициент заполнения объема, зависящий от формы частицы (можно принять  $k = 0,2$  [93]), то площадь, занимаемая зернами на  $1 \text{ мм}^2$  поверхности круга, выразится так:

$$F_{ез} = 10^{-6} n_F d_{с.п.}^2 \sqrt[3]{k^2} \quad (4.31)$$

Таблица 4.8 – Значения  $d_{с.п.}$  для различных зернистостей [33]

Зернистость	63/50	80/63	100/80	125/100	160/125	200/160	250/200	315/250
$d_{с.п.}$ , мкм	56	71	89	112	141	178	223	281

Количество алмазных зерен в  $1 \text{ мм}^2$  поверхности определится по формуле [94]

$$n_F = \frac{182K^{0,65}}{N^{1,95}}, \quad (4.32)$$

где  $K$  – концентрация алмазов в круге;  $N$  – номер зернистости по ГОСТ 3647-71 (в  $0,01 \text{ мм}$ ).

Таким образом, формула для определения электрохимически активной площади в зоне контакта обрабатываемой детали и алмазного круга получит вид:

$$F_d = F_u (1 - 6 \cdot 10^{-6} d_{с.п.}^2 \frac{K^{0,65}}{N^{1,95}}) \quad (4.33)$$

Анализ зависимости показывает, что зернистость и концентрация круга влияет на изменение площади, занимаемой зернами, незначительно, так как

отношение  $\frac{d_{с.п.}^2}{N^{1,95}}$  для диапазона зернистостей 63/50...315/250 колеблется в пределах  $(0,77\text{-}0,82) \cdot 10^2$  и может быть принято  $\approx 0,8 \cdot 10^2$ . С учетом этого обстоятельства можно принять:

$$i_d = \frac{I}{mF_u}, \text{ А/см}^2, \quad (4.34)$$

где  $m$ , зависит от концентрации алмазов (табл. 4.9).

Таблица 4.9 – Величина  $m$  для концентраций  $K$  % алмазов в круге

$K$	50	100	150	200
$m$	0,93	0,89	0,85	0,82

Следовательно, при одной и той же силе тока в цепи действительная плотность тока в зависимости от концентрации алмазов в круге будет на

5-20% больше номинальной. Из-за этого, чтобы номинальную плотность тока выдержать постоянной, нужно с увеличением концентрации алмазов в круге повышать напряжение. Это общая закономерность исследуемого процесса. Она – результат уменьшения площади поверхности электропроводной связки вследствие снижения удельных нагрузок на единичные зерна с ростом их числа. Уменьшение по этой же причине микрогребешков на обрабатываемой поверхности способствует, кроме того, поддержанию более стабильного межэлектродного зазора.

При малых нормальных давлениях ( $p = 6$  кгс/см<sup>2</sup>) для кругов высокой концентрации (150-200%) характерны большие значения рабочего напряжения (5-6 В). Увеличение давления до 22 кгс/см<sup>2</sup> снижает напряжение до 2-3,5 В [61, 62]. Однако круги с малой концентрацией алмазов (менее 100%) при столь больших нормальных давлениях не могут работать из-за сильной электроэрозии, вызванной существенным уменьшением межэлектродного зазора. В этом случае увеличивается доля электроэрозионных процессов при сравнительно малых рабочих напряжениях технологического тока (менее 1-2 В), а также повышается доля электроконтактных процессов, усиливающих разрушение связки круга и преждевременное выпадение из нее алмазных зерен. Так, кругами с концентрацией алмазов 50% при  $p = 22$  кгс/см<sup>2</sup> шлифование реализовать невозможно. Следовательно, для эффективного ведения процесса АЭХШ с большими плотностями тока и нормальными давлениями нужно использовать круги с высокой концентрацией алмазов на прочной связке хорошей электропроводности.

Изменение межэлектродного зазора и его сопротивления с изменением нормального давления требует для сохранения постоянной плотности тока снижения рабочего. Например, при увеличении нормального давления от 2 до 22 кгс/см<sup>2</sup> напряжение необходимо уменьшать с 6,5 до 1 В для сплава Т15К6 и с 8,8 до 2В для сплава ВК8 (рис. 4.89). Можно полагать, что сопротивление участка электрической цепи «круг-деталь» при этом падает в результате большего внедрения зерен в обрабатываемый материал, уменьшения зазора и увеличения количества возникающих мостиков контакта связки с деталью, а также вследствие более интенсивной депассивации анодной поверхности вновь вступающими в работу алмазными зернами, имеющими большую глубину залегания от вершины максимально выступающего из связки зерна.

Установленная закономерность представляется одной из принципиальнейших для процессов АЭХШ с большими давлениями. Ранее в ряде работ отмечалось, что форсированию режимов шлифования, в частности повышению нормального давления сверх 10-12 кгс/см<sup>2</sup>, препятствуют вибрации и интенсивная электроэрозия.

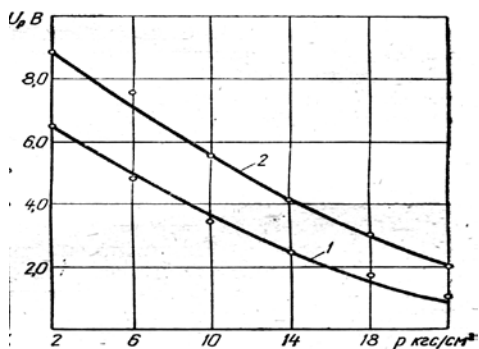


Рисунок 4.89 – Кривые зависимости рабочего напряжения от нормального давления для Т15К6 (1) и ВК8 (2)  
 $v = 25 \text{ м/с}$ ;  $S_{\text{пр}} = 1,0 \text{ м/мин}$ ;  $i = 40 \text{ а/см}^2$ ;  
 круг АЧК 150x10x3x32 АСБ 100/80 МВ1-П-100%

Причина в том, что, повышая нормальное давление, сохраняли напряжение 6-8 В, принятое как оптимальное для более низких нормальных давлений. В условиях, когда межэлектродный зазор из-за роста нормального давления значительно уменьшался, это напряжение приводило к многочисленным пробоям межэлектродного промежутка, возникновению настолько мощной электроэрозии, что процесс шлифования приходилось прекращать. Следовательно, для сохранения постоянной плотности тока, обеспечивающей требуемую интенсивность электрохимического растворения, при высоких нормальных давлениях рабочее напряжение необходимо снижать до 1-3 В [61, 62]. Это исключает опасный уровень электроэрозии и стабилизирует протекание АЭХШ.

Для нормального давления 22 кгс/см<sup>2</sup> плотность тока и напряжение при обработке сплава Т15К6 можно выбирать, используя зависимость, представленную на (рис. 4.90). Обычно применяемые плотности тока 40-80 А/см<sup>2</sup> в этом случае можно реализовать при рабочем напряжении 1,2-2,5 В. Для сплава ВК8 эти величины несколько сдвигаются в сторону больших значений, что связано с его свойствами.

Интенсификация электроалмазного шлифования повышением плотности тока при сохранении остальных условий обработки неизменными требует увеличения напряжения (рис. 4.91). Характер изменения напряжения при этом зависит от обрабатываемого материала и вида алмазного круга. В общем случае для достижения одной и той же плотности тока при обработке ВК8 требуется большее напряжение технологического тока, чем при шлифовании Т15К6.

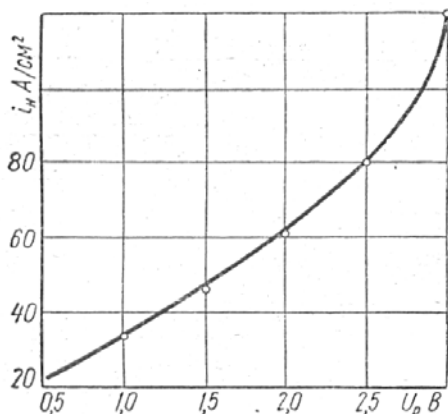


Рисунок 4.90 – Кривая зависимости плотности тока от рабочего напряжения для Т15К6  
 $v = 20$  м/с;  $S_{np} = 1,0$  м/мин;  $p = 22$  кг/см<sup>2</sup>;  
 круг АЧК 150x10x3x32 АСБ 100/80 МВ1-П-100%

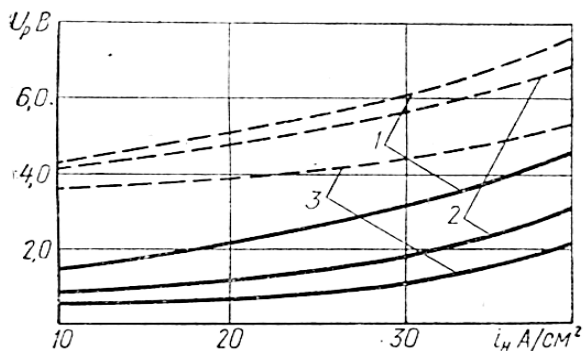


Рисунок 4.91 – Кривые зависимости рабочего напряжения от плотности тока для ВК8 (---) и Т15К6 (—) при  $p$  кг/см<sup>2</sup>:  
 1 –  $p = 10$ ; 2 –  $p = 16$ ; 3 –  $p = 22$ ;  $v = 22,5$  м/с;  $S_{np} = 1,0$  м/мин;  
 круг АЧК 150x10x3x32 АСБ 250/200 МВ1-П-150%

Большая склонность сплава ВК8 к пассивации вызывает необходимость увеличивать энергозатраты для успешного протекания электро-физико-химических процессов. Этому же способствуют большая прочность сплава ВК8 и меньшая степень разрыхления поверхностного слоя в результате его анодного растворения.

Следует иметь ввиду, что при  $p = 22 \text{ кгс/см}^2$  алмазные зерна успешно выполняют роль депассиваторов, что при установившемся статистически постоянном профиле круга исключает изменение межэлектродного зазора, а, следовательно, и резкое изменение рабочего напряжения, приводящее к интенсификации эрозивных процессов. Вибрации, возникающие в процессе шлифования твердых сплавов кругами различной зернистости, изменяют характер взаимосвязи между нормальным давлением и напряжением. Если при обработке кругом АСБ 100/80 для поддержания постоянной плотности тока с повышением нормального давления напряжение нужно уменьшать, то появление вибраций при шлифовании кругом АСБ 250/200 с давлением более  $14\text{-}16 \text{ кгс/см}^2$  вызывает увеличение среднего межэлектродного зазора, а, следовательно, и требуемого напряжения.

Аналогично объясняется взаимосвязь напряжения, продольной подачи и скорости круга. Характер их взаимозависимости определяется тем или иным сочетанием факторов. Если вибраций нет или они незначительны, для любого (в исследуемом диапазоне) значения продольной подачи наблюдается уменьшение напряжения с повышением скорости резания (рис. 4.92).

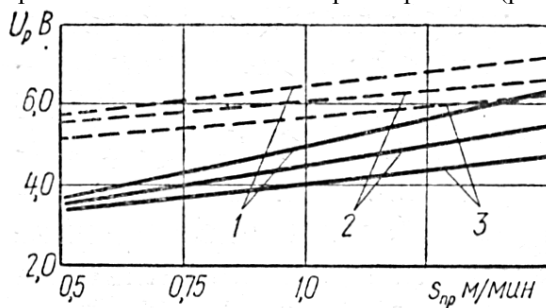


Рисунок 4.92 – Кривые зависимости рабочего напряжения от продольной подачи

для ВК8 (---) и Т15К6 (—) при  $v$  м/с:  
 1 –  $v = 15$ ; 2 –  $v = 20$ ; 3 –  $v = 25$ ;  $p = 16 \text{ кгс/см}^2$ ;  $i = 25 \text{ а/см}^2$ ;  
 круг АЧК 150x10x3x32 АСБ 250/200 МВ1-П-200%

Это объясняется ростом степени депассивации обрабатываемой поверхности вследствие увеличения в единицу времени числа встреч алмазных зерен с ней и улучшения гидродинамических условий, т.е. увеличения скорости обмена электролита в межэлектродном зазоре. Например, при шлифовании твердого сплава ВК8 кругом АСБ 100/80 с продольной подачей  $S_{пр} = 0,75 \text{ м/мин}$  необходимое для поддержания плотности тока  $i = 25 \text{ А/см}^2$  напряжение при обработке со скоростью резания  $V = 30 \text{ м/с}$  меньше, чем со скоростью  $V = 15 \text{ м/с}$ , что согласуется с

приведенным выше объяснением. Вместе с тем, при шлифовании со скоростью  $V = 30$  м/с увеличение нагрузки на единичные алмазные зерна с ростом продольной подачи приводит к возникновению вибраций в системе. Вследствие этого значительно увеличивается интенсивность роста напряжения с изменением продольной подачи и при  $S_{пр} = 0,75$  м/мин и  $V = 30$  м/с напряжение становится больше, чем при обработке со скоростью  $V = 15$  м/с (рис. 4.93).

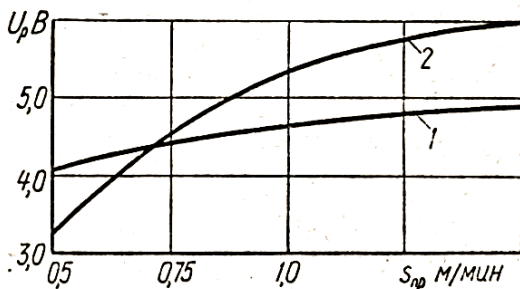


Рисунок 4.93 – Кривые зависимости рабочего напряжения от плотности тока для ВК8 при  $v$  м/с:

1 –  $v = 15$ ; 2 –  $v = 30$ ;  $p = 16$  кгс/см<sup>2</sup>;  $i = 25$  а/см<sup>2</sup>;  
 круг АЧК 150x10x3x32 АСБ 100/80 МВ1-П-150%

#### 4.7.2.5. Роль электроэрозии

Установленные закономерности изменения рабочего напряжения в различных условиях шлифования позволяют по-новому подойти к оценке роли электроэрозионных явлений в межэлектродном зазоре. Противоречивые мнения, широко представленные в литературе, отражают сложность этого явления и его влияния на различные стороны процесса обработки.

Практика показала, что интенсивные электрические разряды несомненно опасны для износостойкости круга и качества обработанной поверхности, для электрооборудования станка и стойкости электролита. В то же время нельзя отрицать важное значение эрозионной составляющей в съеме припуска, в эффектах взаимодействия явлений, а также некоторых других сторонах процесса АЭХШ.

Тщательное исследование на электронном микроскопе поверхности после обработки с изменением условий в широком диапазоне показало, что практически всегда есть участки, сформировавшиеся в результате электроэрозионного процесса [[61, 6 2, 63]. Естественно, что большое нормальное давление, высокая плотность тока и малые межэлектродные зазоры способствуют интенсификации электрических разрядов, которые на иных стадиях могут стать определяющими. Здесь необходимо учитывать и

заполнение межэлектродного зазора срезаемой стружкой.

С увеличением нормального давления зазор уменьшается за счет сближения средних линий профилей поверхностей детали и круга (см. рис. 4.84). Этому же способствует большая глубина внедрения алмазных зерен. Зазор должен вмещать все большие объемы токопроводящих частичек, образовавшихся в результате диспергирования поверхностей. Ориентируясь в зазоре под действием электрического поля, они существенно изменяют параметры промежутка, вызывая соответствующее перераспределение потенциала в нем и облегчая электрический пробой [36]. Одним из факторов, приводящих к электрической эрозии, является локальный пробой, образующийся в процессе анодного травления оксидной пленки на выступающих участках поверхности. Пробойное напряжение в этом случае находится в пределах 0,5-1,6 В [97].

Электрические разряды непосредственно способствуют удалению срезаемого слоя, разрушая обрабатываемый материал. Повышению общей производительности обработки способствует депассивирующее воздействие разрядов на обрабатываемую поверхность, а также разрушающее воздействие на стружку и связку круга. Положительная роль электрических разрядов возрастает, если их интенсивность не оказывает отрицательного влияния на расход алмазов и качество поверхностного слоя детали. Следовательно, не всякий уровень электроэрозии при АЭХШ нежелателен. Напротив, определенная интенсивность электроэрозионных разрядов позволяет поддерживать постоянной величину межэлектродного зазора (вследствие более интенсивного удаления с поверхности круга продуктов растворения и стружки) и высокую режущую способность круга (вследствие своевременного удаления из связки затупившихся алмазных зерен).

Механизм разрушения материала при электрофизическом воздействии на металл достаточно полно объясняет электродинамическая теория, предложенная Б.Р. Лазаренко. В рассматриваемом процессе носителем энергии является поток электронов. Торможение потока твердой металлической поверхностью изделия-анода вызывает значительное повышение температуры, приводящей к плавлению его микрообъемов [98]. В дальнейшем под действием электродинамических (пондеромоторных) и газодинамических (ударная волна) сил, приводящих к резкому увеличению напряжений в поверхностном слое (свыше 200 кгс/мм<sup>2</sup> [99]), этот слой и микрообъемы удаляются, образуя на этой поверхности кратеры (рис. 4.94).

Из зоны воздействия потока электронов вещество выбрасывается в виде паров, мелких капель, твердых осколков, что сопровождается трещинообразованием, растрескиванием и раскалыванием карбидов, разрыхлением поверхностного слоя (рис. 4.95) [61, 62].



Рисунок 4.94 – Оплавление поверхности сплава Т15К6 в результате действия эрозионного разряда

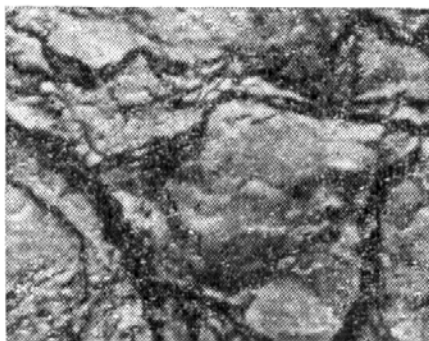


Рисунок 4.95 – Растрескивание и раскалывание карбидов сплава Т15К6 в результате действия электро- и газодинамических сил

Электрические разряды не только принимают участие в снятии припуска, но и существенно влияют на протекающие при АЭХШ практически всех процессов (анодное растворение, пластическая деформация, образование свободных поверхностей вследствие диспергирования металла, разрушение пленок и др.), усиливая или ослабляя их воздействие на обрабатываемую поверхность и рабочую поверхность алмазного круга. Эти процессы, в свою очередь, оказывают влияние на мощность и количество возникающих эрозионных разрядов, обуславливает наличие дополнительных эффектов.

Контактно-дуговые и искровые разряды способствуют значительному увеличению плотности тока при АЭХШ с большими подачами или нормальными давлениями (рис. 4.96) [ 82]. Соотношение между электрохимической и разрядной составляющими общего тока изменяется с увеличением подачи: доля разрядного тока возрастает, а электрохимического изменяется прямо пропорционально подаче. Для шлифования торцом чашечного круга эти закономерности имеют особое значение, так как площадь контакта здесь значительна, а удаление стружки и продуктов электрохимических реакций, тепло- и массопередача затруднены.

Необходимо учитывать, что эрозионное воздействие разрядного тока определенной интенсивности на рабочую поверхность круга поддерживает его высокую режущую способность. Из межзеренных пространств удаляются продукты шлифования и тончайшие слои токопроводной связки, что обеспечивает как необходимое выступание зерен алмаза, так и их удержание. Изучение рабочей поверхности алмазных кругов в процессе АЭХШ с большими давлениями показало, что в значительной степени она сформирована под воздействием эрозионных разрядов.

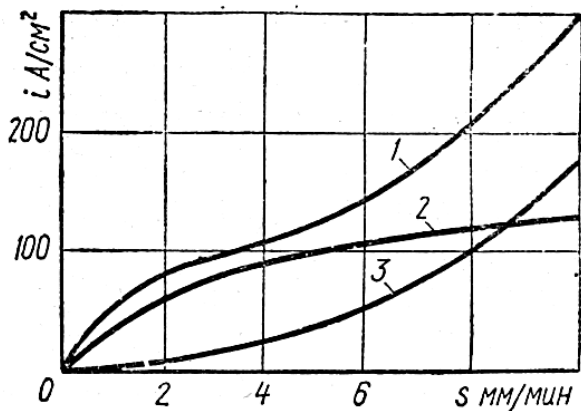


Рисунок 4.96 – Изменение общего (1), электрохимического (2) и контактно-дугового (3) токов с увеличением подачи

Этому, видимо, следует отдать предпочтение в оценке причин, обеспечивающих высокую производительность данного процесса.

В настоящее время уже определен тот диапазон условий, когда эрозионное воздействие на связку дозируется лишь таким, чтобы оно поддерживало необходимое выступание алмазных зерен над связкой, эффективное использование режущих свойств алмазов и достоинств электролитического растворения. Следует отметить, что электрическая эрозия связки кругов - не единственное следствие электрических разрядов в зазоре. Установлено, что они вызывают такие изменения в кристаллической решетке материала связки, которые проявляются в повышении ее износостойкости, а, следовательно, и круга. Суммарный эффект этого явления определяется тем, какой объем связки удалается электрическими разрядами и какова степень ее упрочнения.

Не менее важно и воздействие электрических разрядов на алмазы. Искровую обработку по воздействию на токонепроводящие кристаллы А.А. Воробьев [100] сравнивает с термической обработкой. На свойства тел, определяемые запасенной энергией, она оказывает менее сильное влияние, чем примеси. Энергия, запасаемая в теле при комнатной температуре во время пластической деформации, предшествующей его разрушению, оказывается на два порядка ниже, чем энергия, запасаемая при закалке или рентгеновском облучении.

Изменение энергии системы за счет запасенной энергии вызывает значительные изменения свойств тела. Для алмазов, как и для других высокотвердых материалов (керамики, твердых сплавов и т.п.), для которых термическое и механическое упрочнение затруднены или невозможны,

применима электроискровая обработка в условиях, когда в обрабатываемых телах создаются дефекты структуры и запасается избыточная (по сравнению с равновесной) энергия. С увеличением поглощенной мощности растет величина запасенной в теле энергии и по тем же законам изменяется твердость тел.

*Синтетический алмаз – инструментальный материал с большой энергией связи между его частицами.* Поэтому относительная величина прироста твердости, обусловленной действием электрически разрядов, для таких материалов высока. Лазаренко Б.Р. [98] указывал, что твердость инструментальных материалов можно значительно повысить искровой обработкой. Таким образом, можно полагать, что после «объскривания» алмаз приобретает большую твердость, чем в исходном состоянии. Это создает дополнительное превышение его твердости над твердостью таких составляющих обрабатываемых материалов, как VC, TiC и WC, которое проявляется в повышении режущей способности алмазного круга. В случаях, когда электрические разряды разрушают алмазные зерна, на их удержавшихся в связке объемах возникают поверхности с острыми, хорошо развитыми микрокромками, т.е. обновляется режущая поверхность алмазных зерен, что также повышает режущую способность алмазных кругов.

#### ***4.7.2.6. Разрушение обрабатываемого материала***

При электроалмазном шлифовании припуск удаляется в результате сложных электрохимических и электрофизических процессов, протекающих в межэлектродном зазоре, и механического разрушения. На обработанной поверхности одновременно видны следы, оставленные алмазными зернами (рис. 4.97, *а*), электрохимически растравленные участки (рис. 4.97, *б*), следы эрозионного воздействия (рис. 4.97, *в*) и электроконтактного оплавления (рис. 4.97, *з*) [61, 62]. В общем случае условия электроалмазного шлифования определяются напряжением технологического тока, характеристикой круга, номинальной площадью его контакта с обрабатываемой деталью и режимом резания. Между электрическими и механическими параметрами обработки существует определенная связь.

Экспериментально доказано [62], что возникающие в процессе электроалмазного шлифования с большими давлениями электрические разряды играют существенную роль в съеме припуска в широком диапазоне изменения параметров режима обработки. Анализ этих данных позволяет схематически представить зону контакта детали и алмазного круга при обработке с малыми межэлектродными зазорами и большими нормальными давлениями. Схема (см. рис. 4.85) отражает момент одновременного воздействия всех рассмотренных электрофизико-химико-механических факторов.

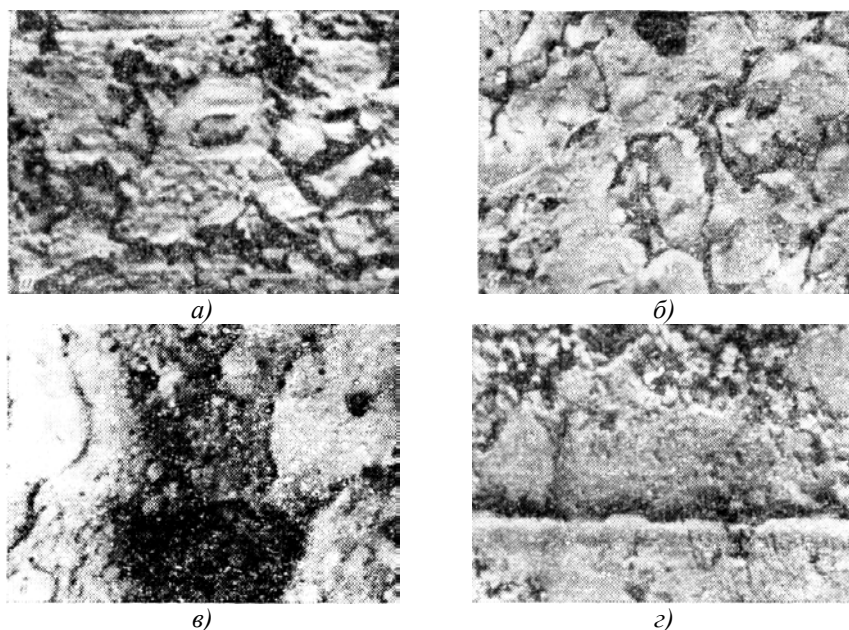


Рисунок 4.97– Участки поверхности Т15К6, сформированные в результате:  
а – резания алмазными зернами; б – анодного растворения;  
в – электроэрозии; г – электроконтактного оплавления

В реальном процессе факторы могут воздействовать и не одновременно. Однако независимо от характера последовательности протекания того или иного явления схема иллюстрирует, как съем припуска осуществляется в результате резания алмазными зернами, анодного растворения, электроконтактного оплавления и эрозионного воздействия.

Немаловажную роль в этом играет вид стружки и количество диспергированных частиц. При шлифовании, например, стали (рис. 4.85, а) характер снимаемой стружки дает основание предположить, что вероятность возникновения эрозионного следа на поверхности связки больше, чем на обрабатываемой поверхности. Это связано с тем, что в большинстве случаев дуговой разряд возникает в месте оплавления под действием высоких температур замыкающего конца стружки и разрыва в этом месте электрической цепи при относительном перемещении круга и детали. Возникновение же следа в рассматриваемом случае на обработанной поверхности возможно лишь при полном сгорании стружки. При электроалмазном шлифовании твердых сплавов (рис. 4.85, б) материал с обрабатываемой поверхности удаляется в виде мелкодисперсных частиц,

представляющих собой блоки карбидов, закрепленных связующим элементом (кобальтом), отдельные карбиды и их осколки, что обусловлено характером разрушения хрупких материалов при резании алмазными зернами. В этом случае с одинаковой вероятностью возможно сплавление микроучастков как в зоне контакта диспергированной частицы со связкой круга и с обрабатываемой поверхностью, так и в зоне контакта отдельных частиц между собой.

Экспериментально установлено, что роль каждого из рассмотренных явлений в удалении припуска, влияния на рабочую поверхность алмазного круга и формирования поверхностного слоя обрабатываемой детали непостоянна. В реальных условиях электрический режим шлифования нестабилен как в пределах площади контакта, так и в различные периоды шлифования. Одной из причин является наличие продольной подачи, изменяющей номинальную площадь контакта, а, следовательно, действительное электрическое сопротивление в межэлектродном зазоре и, соответственно, плотность тока. Изменение зазора на отдельных участках в пределах номинальной площади контакта круга с деталью в большой степени определяется развитостью рабочей поверхности круга (размерами располагающихся на ней алмазных зерен и их концентрацией в алмазоносном слое) и шероховатостью обрабатываемой поверхности. Характер протекания различных процессов на отдельных участках межэлектродного промежутка, их взаимосвязь и взаимовлияние существенно зависят также от характеристики круга, физико-химических свойств обрабатываемого материала, т.е. прочности разрывающихся связей, состава твердого сплава, равномерности растворения его компонентов и др. Сложность происходящих явлений, к сожалению, затрудняет полное аналитическое описание процесса разрушения материала при алмазном электрохимическом шлифовании. В настоящее время есть лишь разрозненная информация о некоторых его сторонах.

#### ***4.7.2.7. Сопутствующие механизмы разрушения***

Анодный процесс и эрозионные электрические разряды порождают при резании абразивными зернами сопутствующие механизмы разрушения.

Под действием сил резания при достижении ими некоторой критической величины в материале возникает характерное распределение напряжений в месте разрушения. В результате накопления дислокаций, перемещающихся в механически деформируемом объеме [102], перед такими препятствиями, как границы зерен и субзерен, атомы растворенных веществ, частицы второй фазы, поверхностные пленки и другое, образуются микротрещины. Этому способствуют уже имеющиеся в материале трещины и микропоры, в т.ч. и образованные под действием электроэрозионных разрядов. Следовательно, наиболее интенсивно разрушение протекает по границам зерен карбидов, являющихся значительным препятствием для

дислокаций.

Структурные дефекты, вызванные наличием дислокаций, приводят к тому, что анодное растворение твердого сплава протекает также преимущественно по границам зерен (рис. 4.98). Разупорядоченность атомов вдоль дислокаций делает эти участки более реакционноспособными. Растравливание микроучастков поверхности также уменьшает напряжения, необходимые для деформации и разрушения материала. Действие этого явления аналогично действию явления, известного под названием «коррозии под напряжением» (рис. 4.99) [61, 62]. Глыбистый характер участка поверхности и наличие трещин на некоторых зернах свидетельствуют о том, что в результате коррозии под напряжением может наступать как транс-, так и интеркристаллитное (рис. 4.100) разрушение [103].

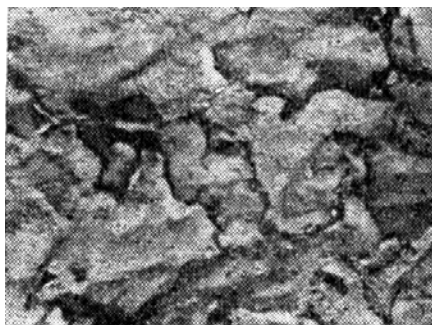


Рисунок 4.98 – Анодное растворение сплава T15K6 по границам зерен

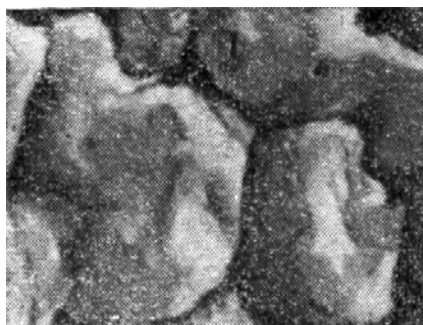


Рисунок 4.99 – Коррозионное разрушение под напряжением

Образующиеся продукты растворения заполняют межэлектродный зазор и пассивируют анодную поверхность.

В результате локализации пластической деформации возле вершины зародышевой трещины оксидные пленки, образующиеся при анодном растворении металла, разрываются. Растворение возле вершины трещины приводит к дальнейшей концентрации напряжений, а, следовательно, и к дальнейшей локализации пластической деформации, которая препятствует восстановлению пассивирующей пленки. Таким образом, распространение трещины осуществляется благодаря непрерывному течению и локальному растворению материала возле ее вершины, т.е. анодное растворение, с одной стороны, облегчается при непрерывной пластической деформации (механохимический эффект), а с другой – способствует возникновению последующей локальной деформации (хемомеханический эффект). Итак, если образование микродефектов при коррозии происходит медленно и в течение нескольких часов и даже десятков часов, то микрорастворивание возникает

уже в первые мгновения после начала анодного растворения.

Вообще расстраивание протекает по границам зерен и процесс зависит от величины зерен, т.е. от протяженности границы между ними. Образование микротрещин связано с природой хрупкого разрушения твердых сплавов, наблюдаемого и при резании единичным алмазным зерном без анодного растворения. Отличием при совмещенном процессе можно считать появление лунок, травление которых приводит к растрескиванию. Общая поверхность травимого сплава резко возрастает. В дальнейшем наблюдается сглаживание рельефа по контуру микротрещины.

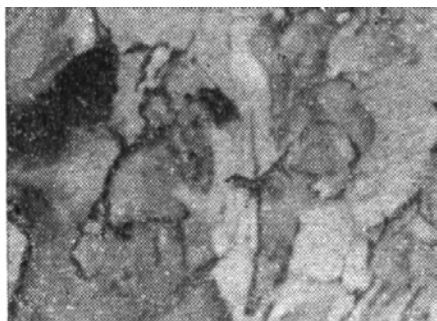


Рисунок 4.100 – Трещины, проходящие через внутренние области зерен карбидов (интеркристаллитное разрушение)

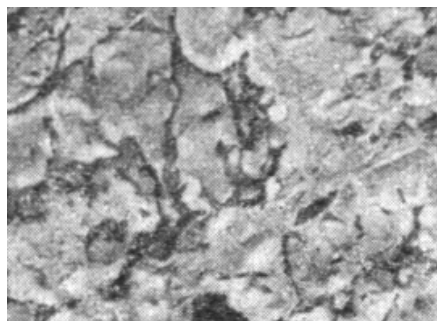


Рисунок 4.101 – Участки поверхности со следами водородного растрескивания

Если рассмотренное совместное воздействие дополняется интенсивными электрическими разрядами в межэлектродном зазоре, то на поверхности появляются эрозионные кратеры, в зонах которых возникают более мелкие лунки или группы лунок (см. рис. 4.97, в). Продолжительное воздействие электрических разрядов приводит к образованию сплошной «сотообразной» поверхности.

Необходимо отметить, что коррозионное разрушение под напряжением может усиливаться охрупчиванием водородом, выделяющимся при катодных реакциях. Водород может входить в твердый раствор и мигрировать в молекулярной форме к границам зерен, включениям и микропорам, где возникают высокие напряжения, и, следовательно, трещины (рис. 4.101). Большое число гребней отрыва, по данным [104], может быть следствием разрушения поверхности, вызванного водородным растрескиванием.

Существенное влияние на проявление рассмотренных типов разрушения могут оказывать разнообразные эффекты облегчения пластического течения и понижения прочности вследствие обратимого

физико-химического влияния среды (эффект Ребиндера). Оно состоит в понижении удельной свободной поверхностной энергии твердого тела, т.е. работы образования его новых поверхностей, в момент их возникновения в процессах деформации и разрушения, имеющего место при совместном действии среды и определенного напряженного состояния [105].

При взаимодействии металла со средой происходит туннельная коррозия, приводящая к образованию коррозионных ямок [106]. Множество таких ямок совместно с неоднородностями и дефектами, уже существующими в материале и образующимися в процессе деформации, облегчают пластическое разрушение материалов. Образованию микротрещин и свободных поверхностей способствует неодинаковая упругость и пластичность кобальтовой связки и карбидов. Возможный характер поверхности, образованной в результате «слияния микропустот», представлен на рис. 4.102.

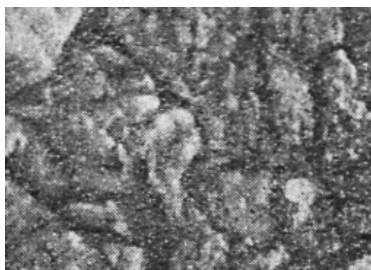


Рисунок 4.102 – Следы отрыва в результате слияния микропустот



Рисунок 4.103 – Микротрещины, образующиеся при оплавлении участков поверхности

Кроме рассмотренных факторов напряжения и анодного растворения на характер разрушения значительно влияет, как было отмечено выше, температура. Если она достигает точки плавления составляющих твердого сплава, то на поверхности остаются оплавленные участки (рис. 4.103). Часто такое разрушение поверхности сопровождается интенсивным образованием трещин. Если же температуры, возникающие на локальных участках поверхности, таковы, что материал только размягчается в результате выделения тепла Джоуля-Ленца, то имеют место следы сильной пластической деформации (рис. 4.104).

При неоднократном попадании участков поверхности в зону действия высоких температур в результате термических напряжений (имеющих в этом случае циклический характер) может наступить усталостное разрушение материала (рис. 4.105). Это объясняется тем, что изменение температур приводит к последовательному изменению напряжений, вызывающих пластическое течение в двух взаимно противоположных направлениях.



Рисунок 4.104 – Термически  
размягченный слой на поверхности  
сплава ВК8

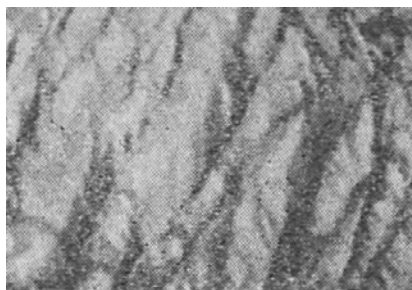
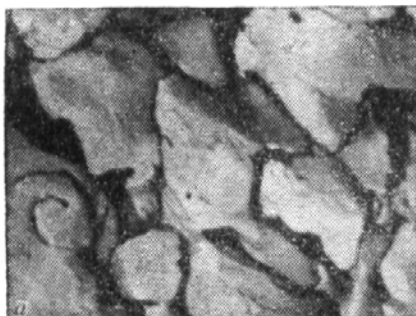


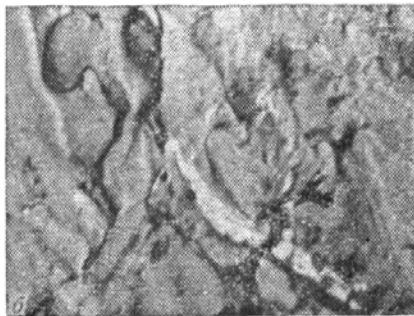
Рисунок 4.105 – Следы  
пластического излома на  
поверхности сплава Т15К6

Различные модули упругости и коэффициенты теплового расширения карбидов и кобальта усиливают действие этого фактора.

Исследования на электронном микроскопе показали [61, 62], что после обработки микро- и субмикрорельеф поверхностного слоя представляет собой поверхность со следами как хрупкого (рис. 4.106, а), так и пластического - вязкого (рис. 4.106, б) – разрушения. Вид разрушения зависит от характера и последовательности воздействия фактора, оказывающего преобладающее влияние на формирование рассматриваемого участка поверхности. Известно, что увеличение температуры способствует пластической деформации, а хрупкое разрушение, характерное для твердых сплавов, усиливается действием электрохимических процессов. При воздействии этих факторов совместно с силовым хрупкому разрушению могут предшествовать значительные пластические деформации (рис. 4.107).



а



б

Рисунок 4.106 – Хрупкое (а) и вязкое (б) разрушение твердых сплавов,  
характерное для электроалмазного шлифования

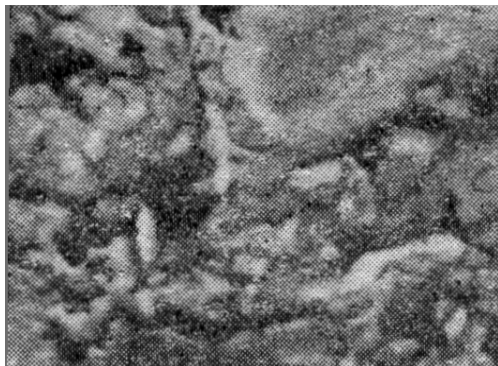


Рисунок 4.107 – Следы хрупкого и пластического (вязкого) разрушения поверхности образцов из сплава

Выше рассмотрена роль алмазных зерен в активации обрабатываемой поверхности. Можно полагать, что анодные процессы не успевают создать значительный изоляционный слой на обрабатываемой поверхности. Видимо в рассматриваемых условиях создается наиболее удачное соотношение между степенью обновления анодной поверхности, анодными процессами и процессами деформации и разрушения обрабатываемого материала под действием алмазных зерен.

Таким образом, силовой фактор, анодное растворение и тепловое воздействие при электроалмазном шлифовании с большими нормальными давлениями вызывают различные механизмы разрушения обрабатываемого материала. Их взаимодействие и взаимовлияние обуславливают сложность и разнообразие микро- и субмикрорельефа поверхностного слоя. *Доминирующим является микроразрушение обрабатываемого материала под воздействием зерен сверхтвердых абразивов.* Вклад электрохимических и электроэрозийных процессов в непосредственный сьем материала, составляющего припуск, значительно меньший, чем обычно указывается для АЭХШ с малыми поперечными подачами или нормальными давлениями.

#### **4.7.3. Производительность процесса и износостойкость алмазных кругов**

Интенсивное разрушение обрабатываемого материала, вызываемое рассмотренными явлениями, сопровождающими процесс силового ЭАХШ, обеспечивает повышение производительности  $Q$  ( $мм^3/мин$  (объем материала, снятого с обрабатываемой поверхности в единицу времени) или  $мм^3/мин·см^2$  (объем материала, снятого с единицы площади контакта круга с обрабатываемой поверхностью в единицу времени) в 1,5-10 раз по сравнению

с обычным алмазным шлифованием. Однако оценка электроалмазного шлифования только с точки зрения повышения его производительности не является исчерпывающей. К основным требованиям, предъявляемым к процессу механической обработки, следует отнести и износ (стойкость) режущего инструмента: для процесса шлифования – износостойкость круга; для процесса алмазного (электроалмазного) шлифования – удельный расход алмазов  $q$ , мг/г (расход алмазов (мг) отнесенный к массе сошлифованного материала ( $g$ )). В ряде случаев в зависимости от требуемых условий шлифования она может оказаться основным эксплуатационным свойством, характеризующим качество обработки. Доказано [62], что при электроалмазном шлифовании с небольшими нормальными давлениями (2-6 кгс/см<sup>2</sup>) производительность процесса значительно ниже, а удельный расход выше (в зависимости от условий шлифования) в 2-10 раз, чем при шлифовании с давлениями 18-20 кгс/см<sup>2</sup> (рис. 4.108). При малых давлениях зазор между связкой круга и деталью таков, что для достижения плотности тока 10 - 40 А/см<sup>2</sup> нужно значительно повышать напряжение, что в результате приводит к появлению мощных электрических разрядов. Электрофизическое воздействие на связку приводит к повышенному износу круга, а разряды вызывают и поддерживают вибрации системы, жесткость которой при этих давлениях достаточно часто оказывается недостаточной. О несомненной связи вибраций с электрическими разрядами и их совместном влиянии на работоспособность алмазных кругов можно судить когда при шлифовании твердого сплава Т15К6 с нормальным давлением 6 кгс/см<sup>2</sup> и плотностью тока 20 А/см<sup>2</sup> (рис. 4.109, кривая 1) удельный расход алмазов составляет немногим более 1 мг/г. Изменение плотности тока всего в 3 раза (до 60 А/см<sup>2</sup>) приводит к увеличению удельного расхода почти в 8 раз. Это можно объяснить только увеличением степени электрофизического воздействия на рабочую поверхность круга, так как значительно увеличивается напряжение, необходимое для поддержания требуемой плотности тока.

На работоспособность круга влияет также и его характеристика. При шлифовании с малыми нормальными давлениями ( $p < 10$  кгс/см<sup>2</sup>) производительность процесса растет с увеличением зернистости круга. Например, с изменением зернистости от 63/50 до 315/250 она увеличивается от 270 до 500 мм<sup>3</sup>/(мин·см<sup>2</sup>) при  $i = 15$  А/см<sup>2</sup> и от 350 до 600 мм<sup>3</sup>/(мин·см<sup>2</sup>) при  $i = 45$  А/см<sup>2</sup> ( $v = 20$  м/с;  $S_{np} = 1$  м/мин;  $p = 10$  кгс/см<sup>2</sup>; круг АЧК 150x10x3x32 АСБ МВ1-П-100%). При давлениях более 10 кгс/см<sup>2</sup> производительность процесса уменьшается, а расход алмазов повышается на 10-20% с увеличением их зернистости. Объяснить это можно тем, что при больших нормальных давлениях значительным оказывается уменьшение доли анодного растворения обрабатываемой поверхности из-за уменьшения степени депассивации ее в результате меньшего числа зерен на рабочей поверхности, а также увеличения межэлектродного зазора.

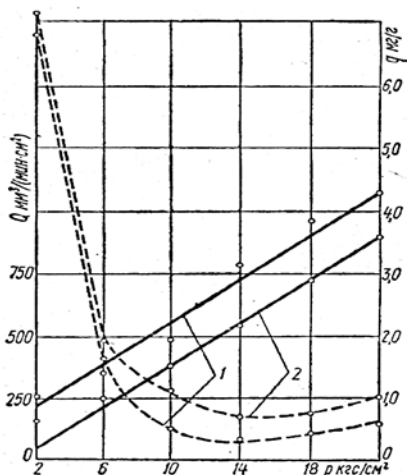


Рисунок 4.108 – Кривые зависимости производительности (—) и удельного расхода алмазов (---) от нормального давления: 1 – Т15К6; 2 – ВК8;  $v = 25$  м/с;  $S_{np} = 1,0$  м/мин;  $i = 40$  а/см²;  $F = 60$  мм²; круг АЧК 150x10x3x32 АСБ 100/80 МВ1-П-100%

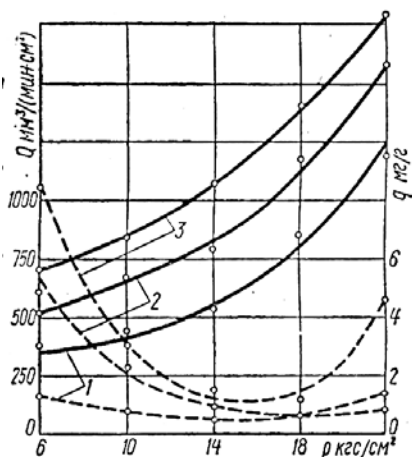


Рисунок 4.109 – Кривые зависимости производительности (—) и удельного расхода алмазов (---) для Т15К6 от нормального давления и плотности тока (А/см²) 1 –  $i = 20$ ; 2 –  $i = 40$ ; 3 –  $i = 60$ ;  $v = 25$  м/с;  $S_{np} = 1,0$  м/мин;  $F = 60$  мм²; круг АЧК 150x10x3x32 АСБ 100/80 МВ1-П-100%

Кроме того, усиливается электрофизическое воздействие на связку круга в результате больших значений напряжения, необходимого для достижения требуемой плотности тока при обработке крупнозернистыми кругами.

Еще больше сказывается на производительности процесса и удельном расходе изменение концентрации алмазов в круге. Однако степень влияния ее при шлифовании на больших (свыше 15 кгс/см²) и малых (до 10 кгс/см²) нормальных давлениях неодинакова (рис. 4.110). С повышением концентрации уменьшается действительная площадь электрохимически активной поверхности. И, несмотря на то, что степень депассивации при этом существенно растет, для достижения требуемой средней плотности тока возникает необходимость значительно увеличивать напряжение. На величине напряжения сказывается увеличение межэлектродного зазора, вызванное уменьшением внедрения зерен в обрабатываемый материал из-за снижения удельных нагрузок на единичные зерна.

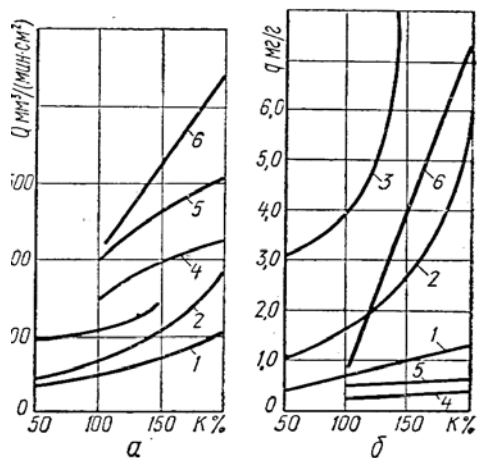


Рисунок 4.110 – Кривые зависимости производительности (а) и удельного расхода алмазов (б) от концентрации круга для Т15К6:  
 1,4 –  $i = 20 \text{ А/см}^2$ ; 1,2,3 –  $p = 22 \text{ кгс/см}^2$ ; 2,5 –  $i = 40 \text{ А/см}^2$ ; 4,5,6 –  $p = 6 \text{ кгс/см}^2$

Степень влияния этих факторов существенно зависит от параметров режима обработки, и в первую очередь от плотности тока и величины нормального давления. Например, при  $p = 6 \text{ кгс/см}^2$  повышение напряжения для достижения  $i = 40 \text{ А/см}^2$  с изменением концентрации от 100 до 200% приводит к увеличению доли электроэрозионных процессов, в результате чего значительно растет износ круга. Сильная электроэрозия и возникающие вибрации при шлифовании кругом 200%-ной концентрации с плотностью тока свыше  $40 \text{ А/см}^2$  исключают нормальное протекание процесса и делают обработку невозможной. Процесс стабилизируется с увеличением нормального давления. Уменьшение доли эрозии и вибраций при существенном росте производительности процесса приводит к снижению удельного расхода алмазов. Однако вследствие усиления роли электрофизических явлений шлифование с  $p > 10 \text{ кгс/см}^2$  кругами малой концентрации (50%) невозможно. Объясняется это наличием больших удельных нагрузок на единичные зерна, что приводит к большему внедрению их в обрабатываемый материал и значительному уменьшению межэлектродного зазора.

Таким образом, в условиях высокопроизводительного электроалмазного шлифования основные показатели процесса существенно зависят как от электрических и механических параметров режима резания, так и от характеристики применяемых алмазных кругов. Сочетание их определяет оптимальные условия работы того или иного алмазного круга и удельную себестоимость съема обрабатываемого материала.

#### **4.7.4. Качество поверхностного слоя**

##### **4.7.4.1. Макро- и микрорельеф обработанной поверхности**

При оценке геометрических параметров поверхности необходимо учитывать ее субмикроскопические несовершенства. Их возникновение обусловлено особенностями внутреннего строения металла и наличием дефектов тонкой кристаллической структуры, а также различными механизмами пластической деформации и разрушения как в процессе обработки, так и в процессе эксплуатации [107]. Особенно это необходимо учитывать для таких изделий, как режущие инструменты. Субмикрорельеф рабочих поверхностей лезвий инструментов после его заточки играет существенную роль в формировании их эксплуатационных параметров и обеспечении высокой работоспособности. В начальный момент работы инструмента исходная шероховатость поверхности изменяется и возникает новая топография поверхности, связанная с величинами субмикроскопического порядка. Именно такое состояние поверхности и определяет ее дальнейшие эксплуатационные характеристики.

Экспериментально установлено [62], что геометрические параметры обработанной поверхности (макро-, микро- и субмикрорельеф) после электроалмазного шлифования с большими нормальными давлениями по абсолютной величине мало отличаются от высоты микронеровностей, образующихся в результате обработки с малыми поперечными подачами. Однако характер зависимости их от условий шлифования в том и другом случае неодинаков, что является следствием как различного динамического состояния системы СПИД, так и отличительных особенностей протекания явлений в межэлектродном зазоре. Специфику образования поверхностного слоя при высокопроизводительном (силовом) электроалмазном шлифовании предопределяет наличие больших удельных нагрузок, а также протекание сложных электро-физико-химических явлений, часто сопровождающихся интенсивным локальным тепловыделением вследствие эрозионных и электроконтактных процессов, что в значительной степени определяется как характеристикой круга, так и сочетанием электрических и механических параметров шлифования. Например, при обработке твердого сплава по схеме упругого шлифования с нормальными давлениями до  $6 \text{ кгс/см}^2$  и оптимальными режимами для заданного алмазного круга, формирование поверхности происходит главным образом за счет электрохимического растворения обрабатываемого материала (рис. 4.111).

На обработанной поверхности хорошо видны границы карбидов, пассивационная пленка и едва заметны следы, оставленные алмазными зернами. О преимущественном электрохимическом воздействии на обрабатываемую поверхность (рис. 4.112) при шлифовании сплава T15K6 с давлением  $6 \text{ кгс/см}^2$  и плотностью тока  $i = 40 \text{ А/см}^2$  свидетельствуют четкие границы карбидов и почти полное отсутствие следов от алмазных зерен.

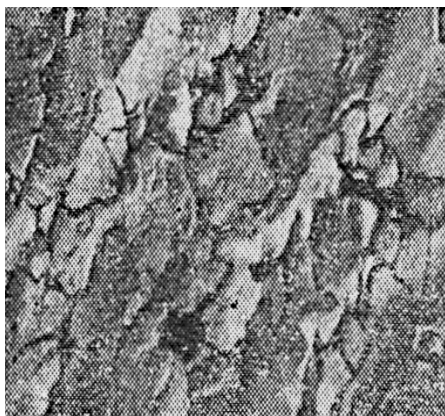


Рисунок 4.111 – Картина анодного растворения сплава Т15К6

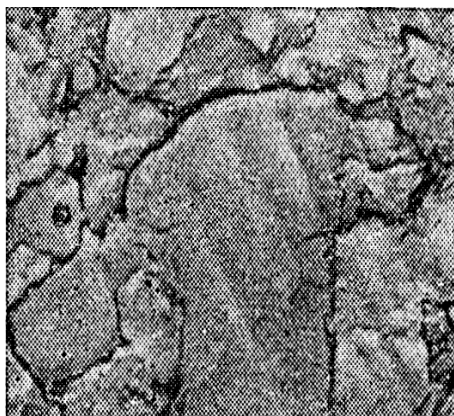


Рисунок 4.112 – Электрохимическое растворение сплава Т15К6 при обработке по схеме упругого шлифования

Об усилении роли силового фактора в формировании поверхностного слоя с ростом нормального давления можно судить по дроблению карбидных зерен и признакам текстуры. Увеличение нормального давления до  $22 \text{ кгс/см}^2$  и плотности тока до  $40 \text{ А/см}^2$  приводит к тому, что поверхностный слой формируется главным образом в результате совместного протекания анодного растворения и силового воздействия (рис. 4.113). Уменьшение величины межэлектродного зазора при этом давлении повышает вероятность возможного контакта связки круга и обрабатываемой поверхности. В результате увеличивается количество участков, сформированных пластическими деформациями поверхностного слоя, размягченного под действием тепла, которое выделяется в зоне контакта (рис. 4.114, а).

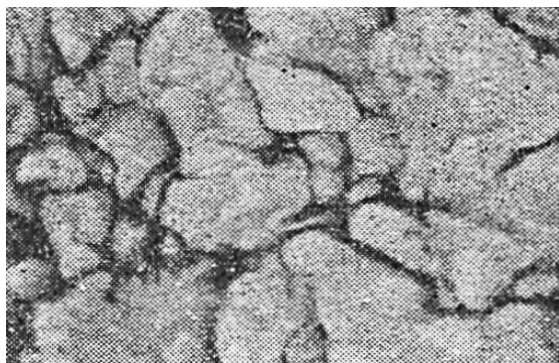


Рисунок 4.113 – Характерные участки поверхности после шлифования сплава Т15К6 с  $p = 22 \text{ кгс/см}^2$ ;  $i = 40 \text{ А/см}^2$

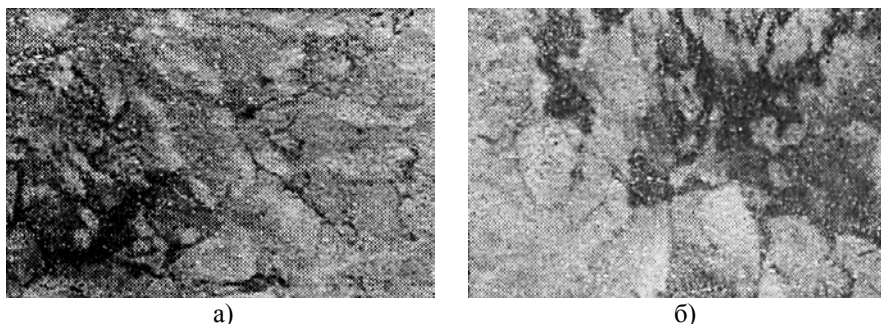


Рисунок 4.114 – Участки, сформированные пластическими деформациями поверхностного слоя (а) и дугowymi и эрозионными разрядами (б) после шлифования сплава Т15К6 с  $p = 22 \text{ кгс/см}^2$  и плотностью тока  $i$ , соответственно, 40 и  $80 \text{ А/см}^2$

Повышение плотности тока сверх  $60 \text{ А/см}^2$  увеличивает количество, которые оплавливают и дополнительно разрыхляют локальные участки поверхностного слоя (рис. 4.114, б). Разряды выделяют большое количество тепла, а это может вызывать интенсивное растрескивание обрабатываемой поверхности.

На характер разрушения и формирования поверхностного слоя влияют также состав и структура обрабатываемого материала. Судя по полученным электронно-микроскопическим снимкам поверхности образцов, степень неоднородности растравливания для сплава ВК8 меньше, чем для сплава Т15К.6. При шлифовании с нормальным давлением  $22 \text{ кгс/см}^2$  и плотностью тока  $i = 20\text{-}40 \text{ А/см}^2$  характер разрушения сплава ВК8 аналогичен характеру разрушения сплава Т15К6, однако с несколько большим проявлением действия силового фактора (рис. 4.115).

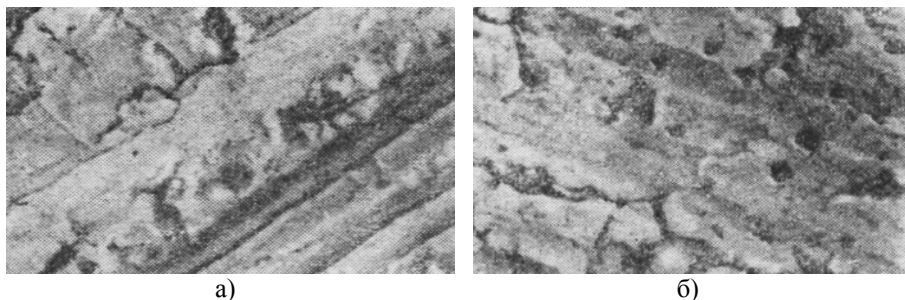


Рисунок 4.115 – Характерные участки поверхности после шлифования сплава ВК8 с  $p = 10 \text{ кгс/см}^2$  (а) и  $p = 22 \text{ кгс/см}^2$  (б);  $i = 40 \text{ А/см}^2$

#### 4.7.4.2. Шероховатость обработанной поверхности

Зависимости высоты микронеровностей от режима обработки и характеристики круга имеют сложный и своеобразный характер и объясняются только при комплексном рассмотрении процесса. Так, малая степень изменения высоты микронеровностей с ростом нормального давления от 12 до 20 кгс/см<sup>2</sup> при шлифовании твердого сплава в большинстве случаев не может служить доказательством того, что с поверхностью никаких качественных изменений не происходит. Как уже было сказано, шероховатость при обработке давлениями 10 и 22 кгс/см<sup>2</sup> одинакова, но природа поверхностного слоя и его микрорельеф в этих случаях различны, так как различен и механизм их формирования [61, 62]. Если при давлении 10 кгс/см<sup>2</sup> микронеровности обусловлены главным образом наличием большого количества следов от алмазных зерен (см. рис. 4.115), то при давлении 22 кгс/см<sup>2</sup> микронеровности зависят в основном от количества вырывов, образующихся в результате значительного электро-физико-химического воздействия (см. рис. 4.114, б). Более низкий уровень шероховатости поверхности сплава ВК8 по сравнению с Т15К6 при обработке их кругом АСБ 100/80 МВ1-П с нормальным давлением 10 - 15 кгс/см<sup>2</sup> (рис. 4.116) можно объяснить большей прочностью ВК8, и, следовательно, меньшей глубиной внедрения алмазных зерен. При обработке сплава ВК8 кругами меньшей зернистости из-за более низких напряжений технологического тока и вследствие этого из-за меньшего электрофизического воздействия на поверхность изменяется характер зависимости микронеровностей от нормального давления. С увеличением его растет как глубина внедрения алмазных зерен в обрабатываемый материал, так и электро-физико-химическое воздействие. В результате шероховатость поверхности увеличивается (рис. 4.116).

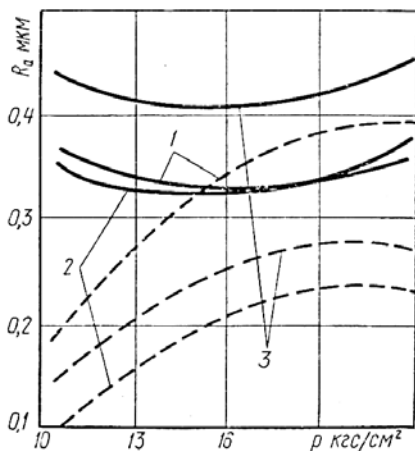


Рисунок 4.116 – Влияние нормального давления на шероховатость поверхности Т15К6 (—) и ВК8 (---):  $K = 100\%$ ;  $K = 150\%$ ;  $K = 200\%$ ;  $S_{пр} = 1,0$  м/мин;  $V = 22,5$  м/с; круг АЧК 150x10x3x32 АСБ 100/80 МВ1-П

#### 4.7.4.3. Остаточные напряжения

Экспериментально установлено [62], что при различном сочетании электрических и механических параметров электроалмазного шлифования твердых сплавов ВК8 и Т15К6 в большинстве случаев образуются остаточные напряжения сжатия, абсолютная величина которых для сплава Т15К6 меньше, чем для ВК8, и достигает соответственно 140 и 350 кгс/мм<sup>2</sup>. Если при шлифовании сплава ВК с плотностью тока  $i = 10$  А/см<sup>2</sup> увеличение поперечной подачи от 0,06 до 0,4 мм/дв. ход приводит к росту величины остаточных напряжений на поверхности в 1,5-2 раза, то такое же изменение подачи при плотности тока  $i = 50$  А/см увеличивает остаточные сжимающие напряжения всего на 20-30% (рис. 4.117).

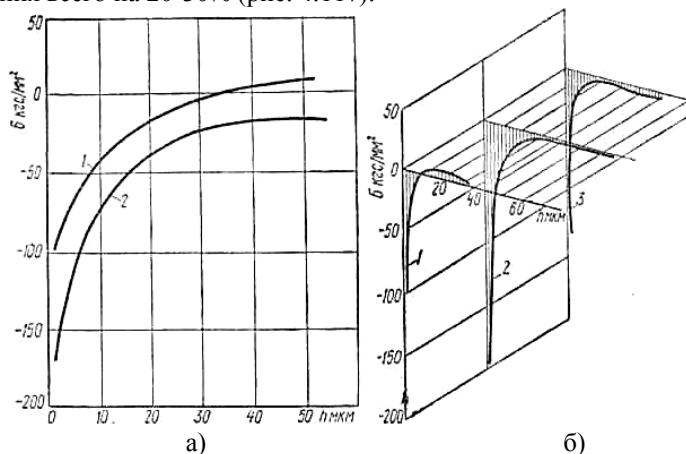


Рисунок 4.117 – Распределение остаточных напряжений в поверхностном слое образцов из сплава ВК8:

а)  $S_n = 0,06$  мм/дв. ход;

1 – без выхаживания; 2 – выхаживание без тока (3 дв. хода);

б)  $S_n = 0,4$  мм/дв. ход; 1 – выхаживание с током (3 дв. хода);

2 – выхаживание без тока (3 дв. хода); 3 – без выхаживания;

$V = 20$  м/с;  $S_{пр} = 1,0$  м/мин;  $i = 50$  А/см<sup>2</sup>;

АЧК 150x10x3x32 АСБ 100/80 МВ1-П-150%

Таким образом, возникновение в поверхностном слое остаточных напряжений сжатия при формировании его в оптимальных условиях свидетельствует о преобладающем действии силового фактора над тепловым. Степень влияния теплового фактора в значительной мере определяется количеством и мощностью возникающих электрических разрядов. Интенсивность их в зависимости от выбранных параметров обработки может

быть настолько велика, что они не только уменьшают остаточные сжимающие напряжения, но и изменяют их знак, т.е. в поверхностном слое возможно формирование растягивающих напряжений. Например, при шлифовании твердого сплава ВК8 с  $S_{\Pi} = 0,06$  мм/дв. ход и  $i = 50$  А/см<sup>2</sup> без выхаживаний (рис. 4.117, а) остаточные сжимающие напряжения меньше, чем при шлифовании с той же подачей и  $i = 10$  А/см<sup>2</sup>. Это свидетельствует о разупрочняющем воздействии электро-физико-химических явлений, усиливающимся с ростом плотности тока. Однако необходимость при этом значительно повышать рабочее напряжение технологического тока ( $U_p = 10,5-11$ В) приводят к появлению большого количества мощных электрических разрядов, в результате действия которых в поверхностном слое образуются растягивающие остаточные напряжения при выхаживании с током (рис. 4.117, кривая 1), в то время, как при шлифовании без выхаживания и с выхаживанием без тока в поверхностном слое формируются остаточные сжимающие напряжения (рис. 4.117, кривые 2 и 3, соответственно).

#### **4.7.4.4. Стойкость твердосплавного инструмента**

Исследовав в лабораторных и заводских условиях влияние вида заточки резцов на их работоспособность [62], можно утверждать, что стойкость резцов после электроалмазной заточки выше (рис. 4.118), чем после абразивной с последующей алмазной доводкой. Так, при точении стали 38ХМЮА (НВ 321-269) резцами с пластинками Т15К6 для принятого критерия износа по задней поверхности  $h_3 = 0,6$  мм стойкость резцов после электроалмазной заточки увеличивается в 1,8 раза. Изучение зависимости стойкости резцов от способа заточки в заводских условиях дало основание утверждать, что электроалмазная заточка резцов позволяет стабильно повышать их стойкость на 15-30% для большого количества материалов, применяемых в качестве как режущих, так и обрабатываемых.

Наблюдаемое увеличение средней стойкости резцов (рис. 4.118) объясняется лучшим состоянием поверхности после электроалмазной заточки. После электроалмазной заточки в большинстве случаев наблюдается равномерное с увеличением пройденного пути нарастание износа по задней поверхности до принятого значения  $h_3 = (0,6-0,7)$  мм и практически нет случаев катастрофического износа до достижения принятого значения. После же абразивной заточки и алмазной доводки часто наблюдается неожиданное разрушение резца при незначительном износе по задней поверхности. Объяснить это можно тем, что после абразивной заточки в результате возникающих в ее процессе высоких температур и больших сил резания увеличивается вероятность трещинообразования. Алмазной доводкой трещины устраниваются не всегда вследствие малых съемов.

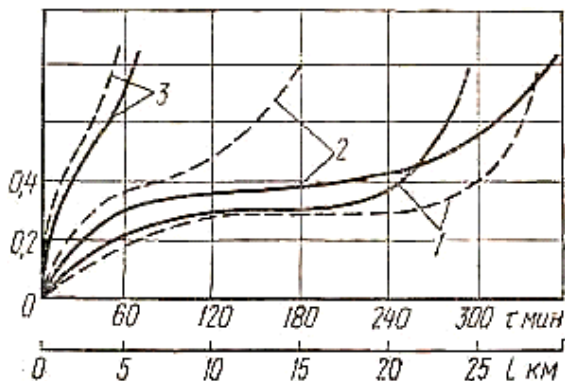


Рисунок 4.118 – Кривые зависимости стойкости резцов от продолжительности  $t$  резания (—), пути  $L$  (---) и способа заточки ( $t = 0,2$  мм;  $S = 0,04$  мм/об):

1 – обрабатываемый материал сталь 45 (HRC48), материал реза Т15К6, заточка электроалмазная,  $V = 100$  м/мин; 2 – обрабатываемый материал У7 (HRC56), материал реза Т30К4, заточка электроалмазная,  $V = 50$  м/мин; 3 – обрабатываемый материал У7 (HRC56), материал реза Т30К4, заточка абразивная с алмазной доводкой,  $V = 70$  м/мин

При точении на заднюю поверхность реза действует среднее нормальное давление, которое, по данным Н.Н. Зорева [108], при фаске износа 0,1 мм для незакаленных сталей (HB 170-240) достигает 50-85 кгс/мм<sup>2</sup>, а для термически обработанных (HRC 20-46) при фаске износа 0,45 мм равно 60-200 кгс/мм<sup>2</sup>. Поэтому увеличение площадки износа на задней поверхности увеличивает и силы, действующие на нее. Разрушается инструмент по достижении ими некоторой критической величины, определяемой прочностью материала реза, а, следовательно, и дефектами поверхностного слоя (трещины, поры, микронеровности и др.).

Преимущества электроалмазной заточки резцов перед другими ее способами наиболее полно проявляются при тонком точении ( $S_{\Pi} < 0,1$  мм/об;  $t < 0,5$  мм). Так, при обработке закаленных сталей стойкость резцов после электроалмазной заточки в 4-5 раз выше. При тонком точении, характеризуемом малыми силами, действующими на рабочие поверхности инструмента, и наличием больших скоростей резания, тепловой фактор превалирует над силовым.

Поэтому процесс приработки прекращается раньше, в результате чего более полно используются качественные характеристики поверхностного слоя. В этом случае сказывается меньшее количество концентраторов напряжений в виде микротрещин. Кроме того, уровень рабочих сжимающих напряжений, представляющих собой сумму остаточных сжимающих напряжений и напряжений сжатия, возникающих под действием высоких

температур, не превышает предела прочности на сжатие. В результате меньше сказываются разрушающие влияния как силового, так и теплового факторов и стойкость инструмента увеличивается.

#### **4.7.5. Практическая реализация силового электроалмазного шлифования**

Одним из сдерживающих факторов широкого внедрения высокопроизводительного (силового, глубинного) электроалмазного шлифования в производство является недостаточное количество (часто и просто отсутствие) специальных станков и устройств для практической реализации в производственных условиях этих прогрессивных процессов, в частности, например, для обработки рабочих поверхностей лезвий инструментов. Накопленные к настоящему времени научная информация и практический опыт позволяют сделать вывод, что установившееся (традиционное) сочетание механических и электрических параметров режима, а также характеристики кругов не способствуют реализации во всех технологических возможностях электроалмазного шлифования. Это связано с тем, что полученные многими исследователями результаты относятся главным образом к обработке с нормальными давлениями менее  $10 \text{ кгс/см}^2$  (при упругом шлифовании) и поперечной подачей  $S_{\text{поп}} < 0,1 \text{ мм/дв. ход}$  (при жестком шлифовании).

Многолетний производственный опыт показал, что наиболее эффективными процессами АЭШ как по упругой, так и по жесткой схемам являются: полная заточка твердосплавного и быстрорежущего инструмента, в том числе глубинная; заточка режущего лезвия совместно со стальной державкой; однопроходное шлифование стружечных канавок цельного твердосплавного и напайного мелкогабаритного инструмента (сверла, метчики, развертки и др.); шлифование стружколомающих элементов на передних поверхностях резцов и другого инструмента; заточка инструментов с режущими элементами из сверхтвердых материалов и др.

Для повышения точности и производительности заточки необходимы такие конструкции приспособления (а.с. 1315244), которые позволяют обеспечить высокую точность обработанной поверхности путем стабилизации величины снимаемого припуска (независимо от случайно изменяющейся его величины) за счет компенсации значительных колебаний размеров затачиваемых инструментов (для любой партии и типоразмеров обрабатываемых деталей) и постоянства усилия резания независимо от условий, определяющих режущую способность абразивного инструмента.

На рис. 4.119 схематически изображено как вариант предлагаемое устройство, отвечающее этим требованиям.

Устройство содержит корпус 1, внутри которого установлен гидроцилиндр 2 со штоком 3. Гидроцилиндр со штоком расположены соосно корпусу с возможностью осевого перемещения относительно него.

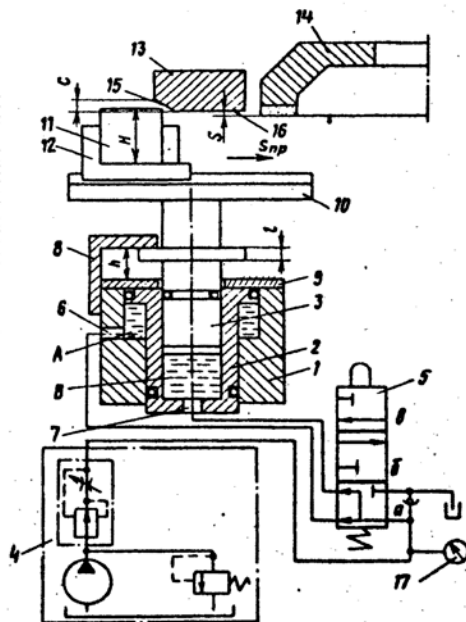


Рисунок 4.119 – Устройство для заточки инструментов по схеме упругого шлифования

Между гидроцилиндром и внутренней поверхностью корпуса образована полость А, которая связана с гидросистемой 4 посредством распределителя жидкости 5 через отверстие 6 в стенке корпуса. Между торцом штока и дном гидроцилиндра образована полость В, также связанная через распределитель жидкости с гидросистемой через отверстие 7.

На корпусе установлена скоба 8. К верхней части корпуса 1 жестко прикреплен ограничитель хода гидроцилиндра 9. Шток жестко связан с приспособлением 10 для закрепления затачиваемого инструмента 11, который устанавливают в резцедержателе (не обозначено) на салазках 12, которые могут перемещаться в направлении продольной подачи  $S_{пр}$ . На пути этого перемещения установлен копир 13 и абразивный инструмент 14. Копир имеет скос 15 и прямолинейный участок 16. Относительное положение копира и абразивного инструмента определяет величину снимаемого припуска  $S$ . На штоке выполнен буртик высотой  $C$ . Скоба 8 установлена на корпусе таким образом, что расстояние между ограничителем 9 и внутренним торцом скобы выбирается из условия:

$$h \ l + k +_{max} + S, \tag{4.35}$$

где:  $l$  – высота буртика на штоке 3;  $_{max}$  – возможное максимальное отклонение размера  $H$  в обрабатываемой партии деталей ( $_{max} = H_{max} + H_{min}$ );  $S$  – величина снимаемого припуска;  $k$  – величина перекрытия, обеспечивающего формирование размера  $S$  при  $H_{min}$ , которое выбирается из условия  $0 < k < p$ , где  $p$  – максимально возможная величина осевого перемещения штока 3 при скольжении детали 12 по скосу 15 копира 13.

Величина усилия прижима затачиваемого инструмента 11 к абразивному инструменту 14 регулируется давлением в гидросистеме 4, контролируемым с помощью манометра 17.

В исходном положении распределителя 5 жидкости (позиция *a*) полости А и В заполнены рабочей средой под давлением, большим необходимого для преодоления веса штока 3 и приспособления 10 с салазками 12, резцедержателем и затачиваемым инструментом 11. Под действием этого усилия шток перемещается вверх до соприкосновения его буртика со скобой 8, а гидроцилиндр – до соприкосновения его с ограничителем хода гидроцилиндра 9.

При перемещении салазок 12 в направлении абразивного инструмента 14 до начала контакта затачиваемого инструмента 11 с копиром 13 распределитель жидкости 5 перекрывает доступ рабочей среды в полость А и открывает слив рабочей среды из полости В через отверстие 7 (позиция *b*). При дальнейшем перемещении салазок в направлении продольной подачи  $S_{пр}$ , когда затачиваемый инструмент 11 начнет контактировать с копиром 13 и скользить по скосу 15, приспособление 10 вместе со штоком 3 перемещается в направлении, перпендикулярном продольной подаче  $S_{пр}$ , выдавливая из полости В излишки рабочей среды через отверстие 7 в гидроцилиндре. При этом гидроцилиндр относительно корпуса остается неподвижным, так как полость А в данный момент заперта. Осевое перемещение штока 3 относительно гидроцилиндра позволяет компенсировать колебания размера  $H$ , погрешность установки и другие неточности.

После выхода поверхности затачиваемого инструмента на прямолинейный участок 16 копира 13 распределитель жидкости закрывает слив рабочей среды из полости В и открывает ее доступ через отверстие 6 в полость А из гидросистемы 4 под давлением, соответствующим требуемому усилию резания (позиция *в*). В процессе упругой заточки постоянство усилия резания обеспечивается за счет осевого перемещения гидроцилиндра относительно корпуса, при этом шток 3 и гидроцилиндр 2 работают как жесткая система, так как полость В заперта. Процесс обработки заканчивается при обеспечении постоянного контакта гидроцилиндра 2 с ограничителем 9, что соответствует удалению припуска  $S$ , определяемого взаимным положением копира 13 и абразивного инструмента 14.

Управление распределителем жидкости 5 можно осуществлять гидравлическим, электрическим или механическим способами.

#### **4.8. Резание материалов в сопровождении сверхзвуковыми струями жидкости с примесями абразивов (гидроабразивное резание)**

##### **4.8.1. Гидроструйное и гидроабразивное резание**

Резание материалов тонким сверхзвуковым потоком жидкости, в том числе с примесями твердых частиц (*струйное резание, гидрорезание или WaterJet Penetration*) – это сравнительно «молодой» метод силового воздействия на обрабатываемую заготовку, чаще всего листовую, с целью придания ей необходимой формы путем отделения определенной части. В основу струйных технологий положена способность компактной тонкой струи жидкости, вытекающей из сопловой насадки под высоким (на уровне 200–500 МПа) давлением со сверхзвуковой скоростью, вызвать критические напряжения в микрообъемах материала, что приводит к развитию микродефектов, их следующему слиянию с отрывом микрочастиц и образованием воронки разрушения [109, 110]. Главную работу по отделению обрабатываемого материала выполняют частицы твердых материалов. Струя жидкости выполняет функцию способа доставки абразива в зону резания. Развиваясь, воронка углубляется, а предоставление струи или заготовке движения подачи ведет к переносу струйного воздействия на другие участки поверхности и к образованию линии резания. Типичная гидрорежущая машина и схема взаимодействия скоротечной струи малого диаметра с обрабатываемым материалом представлена на рис. 4.120.

Заготовка располагается и закрепляется преимущественно горизонтально на рабочем столе гидрорежущей машины, а смонтированный над ней рабочий орган со струйным устройством осуществляет перемещение вдоль заданного контура в плоскости, параллельной плоскости заготовки. При этом рабочим органом поддерживается оптимальное расстояние  $h_{opt}$  между поверхностью обработки и срезом сопла струйного устройства, чем обеспечивается стабильность условий протекания процесса и необходимое качество получаемого резания. Выполнив работу разрушения, струя стекает в бассейн–ловушку, где происходит гашение его остаточной энергии, отстаивание жидкости и подготовка к ее повторному использованию или утилизации.

Использование струи жидкости (как с примесями твердых тел, так и без них) как режущего инструмента позволяет с успехом обрабатывать, прежде всего, неметаллические, низкопрочные материалы: различные пластики, в том числе, слоистые материалы.

Струя жидкости с успехом выполняет контурное резание (раскрой листовых заготовок), прошивки отверстий, выборку пазов и уступов. Возможно выполнение ряда токарных операций [111].

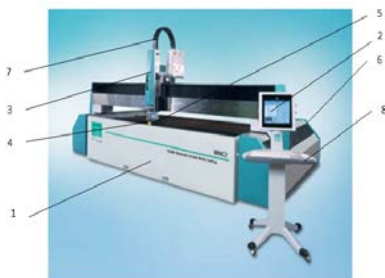
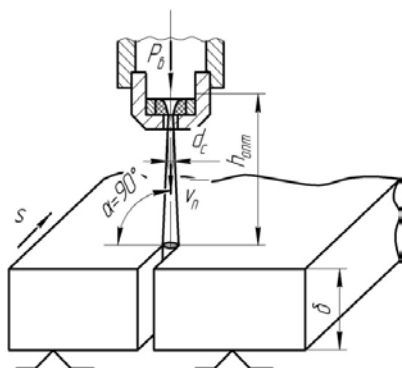


Рисунок 4.120 – Схема взаимодействия скоротечной струи малого диаметра с обрабатываемым материалом (а) и типичная гидрорежущая машина (б): 1 – бассейн-ловушка с рабочим столом; 2 – портал перемещения рабочего органа; 3 – каретка рабочего органа; 4 – струйная или струйно-абразивная головка; 5 – сопловая насадка; 6 – система привода станка и источник питания высокого давления; 7 – магистраль высокого давления; 8 – система управления

При этом производительность процесса предложено оценивать по объемному съему материала  $w$ , мм<sup>3</sup>/, как наиболее обобщенном показателе, который с некоторыми допущениями можно легко определить скорость линейной подачи для материала толщиной  $h$ , мм/с).

Преимущества струйного резания состоят в том, что оно сопровождается незначительным стружкообразованием, высоким коэффициентом использования материала. При этом в зоне резания практически не выделяется пыль, отсутствуют термические изменения и преобразования, что чрезвычайно важно при обработке заготовок, подверженных термической деструкцией. Установлено, что в большинстве случаев температура в зоне резания находится в пределах 60-80°С. Малые нагрузки на заготовку (порядка 20-80 Н) практически не приводят к деформациям и не вызывают возникновения значительных остаточных напряжений в поверхностном слое. Струя жидкости, сформированная профилированным соплом с диаметром на срезе 0,1-0,5 мм, является идеализированным точечным инструментом, способным начинать обработку практически в любом месте поверхности, и далее, при предоставлении движения подачи, получать качественное резание, сопоставимое по ширине с диаметром струи жидкости. Как правило, при гидрорезании листовых заготовок точность выполнения размеров находится в пределах 9-11 квалитетов (иногда 8 квалитета).

Струйные методы резания в системе технологий обработки конструкционных материалов занимают достаточно широкую нишу, что обусловлено способностью идеализированного точечного инструмента по производительности и качеству получаемых поверхностей конкурировать с обработкой материалов давлением (вырубными штампами), механическим резанием, электрохимическим, электроискровым, ультразвуковым и лазерными методами обработки [109].

Несмотря на то, что локализация струйного воздействия в малых объемах позволяет получить плотность кинетической энергии на уровне  $85 \text{ МВт/см}^2$ , способность струи избирательно выполнять работу разрушения и обтекать препятствия (более прочные участки, неровности поверхности), требует поиска новых путей повышения энергетической эффективности гидрорезания и является одним из проблемных факторов метода. Другой проблемой, возникающей при реализации струйного резания, остается проблема максимально полного использования энергии струи. Как правило, сверхзвуковая струя чистой воды, вытекающая из сопловой насадки под давлением до 500 МПа, на выполнение полезной работы расходует не более 3% ее энергии, а с учетом механических и гидравлических потерь в системе этот показатель будет еще меньше.

С этой точки зрения перспективными являются методы, основанные на введении в скоротечный поток растворов полимеров или абразивных частиц, на изменении состояния обрабатываемой заготовки в зоне резания, на устранении ряда эффектов, снижающих гидродинамические нагрузки площадок разрушения, на применении поверхностно-активных веществ, активизирующих деструкцию и диспергацию материала в зоне действия струи и тому подобное. Количество отработанных струйных методов, отличающихся механизмом разрушения обрабатываемого материала, остается незначительным.

Рассмотрим классификацию струйных методов резания материалов. В наиболее общем виде их можно разделить на две принципиально отличные группы:

- методы, основанные на принципе непосредственного выполнения работы разрушения струйным потоком (однофазным или многофазным), обладающим высоким запасом кинетической энергии;

- методы, в которых струя жидкости создает те или иные условия активизации процессов разрушения от других источников или носителей энергии, увеличивает эффективность реализации потенциала энергии твердых частиц.

К *первой группе* относятся:

- 1) струйное резание (гидрорезание, Water Jet Penetrations);
- 2) струйно-абразивное резание (гидроабразивное резание, Abrasive Water Jet process);

3) криоводяное резание (криогенное резание, Water-Ice Jet Penetrations).

Ко второй группе относятся следующие методы:

1) струйно-лазерное термоскалывание;

2) струйно-лазерное резание (*Water Jet Guided Laser Cutting, Laser-Microjet Technology*)

Первая группа методов получила наибольшее распространение в машиностроении, авиационной и радиотехнической промышленности. Методы второй группы активно развиваются и перспективны для использования в области высоких технологий, радиоэлектронике и обработке сверхтвердых материалов. Подробная классификация всех методов струйной обработки материалов, в том числе, резании, представлена в табл. 4.10.

Разрушение материала быстротечным потоком жидкости малого диаметра без абразивных примесей происходит в результате протекания в зоне резания ряда явлений механического и гидродинамического характера, а также абсорбционных, тепловых, химических процессов, приводящих к потере прочности материала [111]. Таким образом, достигается интеграция потенциала резания перечисленных факторов. Потеря прочности при этом носит усталостный полидеформационный характер.

Поскольку движение струи в воздухе и твердых частиц, следует из сопла под давлением более 50 МПа, происходит со сверхзвуковой скоростью, приложенное струйное нагружение поверхности можно считать ударным. Локализованная в малых объемах такая нагрузка вызывает незначительную упругую деформацию тела с быстрым повышением напряжений в зоне обработки до критических значений, после чего происходит квазихрупкое разрушение материала за счет активного развития местных микродефектов (пор, полостей, нарушений структуры, развития дефектов химических реакций, адгезионного или когезионного повреждения инородных включений) с образованием микротрещин.

Элементы микростружки образуются в результате отрыва, скола или смещения микрообъемов поверхности, а физическую схему обработки изотропного однородного материала с некоторыми допущениями можно считать подобной схеме обработки материала режущим микроклинком. Форма и размеры отделяемой от материала микростружки разные и зависят от скорости натекания жидкости, диаметра сопла, скорости рабочей подачи, а также от прочности материала и его склонности к проявлению хрупких свойств.

Квазихрупкое разрушение в процессе обработки происходит по нескольким схемам вследствие неоднородности струи и зависит от условий взаимодействия струи с обрабатываемым телом.

Таблица 4.10 – Классификация методов струйной обработки материалов

Классификационный признак	Виды обработок		
	Очищение	Резание	
По типу выполняемых операций	Поверхностная обработка	Объемная обработка	Обработка в нестабильном режиме (несквозное прошивание и выполнение глухих отверстий)
По типу обрабатываемых материалов	Очищение поверхностей прочных пластмасс и металлов от покрытий и загрязнений	Резание низкопрочных материалов	+
		Резание конструкционных пластмасс и композитов	+
		Резание сталей и сплавов	+
		Резание труднообрабатываемых материалов	+/-
По составу технологической жидкости	Обработка чистой водой	+	+
	Обработка растворами		
	Обработка многокомпонентными потоками		
По схеме влияния струи на обрабатываемый материал	Непрерывная струя	Непрерывная струя	Непрерывная струя
	Пульсирующая		Импульсная
По форме каналов струйноформирующих сопел	Сопла с центральным каналом в виде окружности	Сопла с центральным каналом в виде окружности	+

	Щелевые сопла (сопла с изменяющейся геометрией)		
По типу применяемых струйноформирую- щих устройств	Обработка единичной струей	Обработка единичной струей	+
	Обработка роторными устройствами		
	Обработка вихревыми устройствами		
По типу активизации процессов гидроразрушения	Устранение вредных эффектов	Введение дополни-тельной энергии Изменение свойств Устранение вредных эффектов	+

Идеализированный инструмент – струя – неоднородный по составу и имеет четко выраженное осесимметричное ядро, форма которого приближается к форме конуса, и оболочку, состоящую из аэрированной жидкости, которая при удалении от среза сопла превращается в поток отдельных капель.

При этом вследствие наличия поперечного давления в струе поток за соплом слегка расширяется, но главные изменения происходят в структуре струи: компактное ядро сокращается, постепенно приобретает волновую структуру и, наконец, распадается на отдельные фрагменты. Именно поэтому расстояние в  $(75-100) d_c$ , на котором компактное ядро еще сохраняется, а струя имеет достаточную скорость (следовательно, и запас кинетической энергии), является оптимальным с точки зрения эффективности использования энергии струи.

Для того чтобы резание происходило с приемлемой производительностью, необходимо обеспечить превышение давления утечки такого критического уровня, при котором компактное ядро струи, попадая на поверхность обработки, вызывает лавинообразное разупрочнение и активное трещинообразование с последующим разрастанием трещин до критических значений (рис. 4.121).

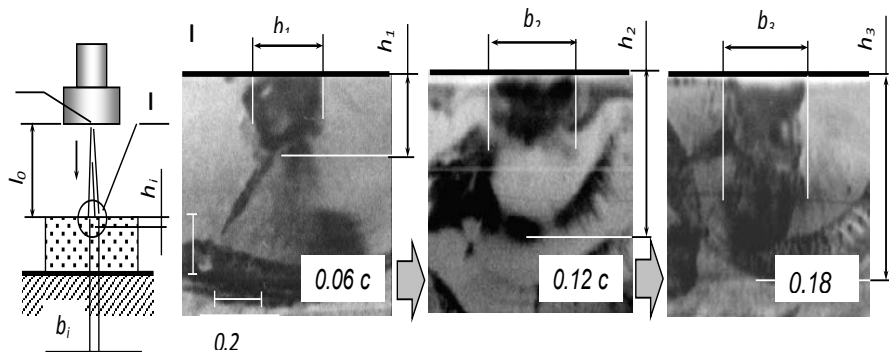


Рисунок 4.121 – Развитие воронки разрушения с течением времени

Обозначив эффективность гидрорезания отношением энергии, затраченной на разрушение материала  $E_p$ , к потребляемой гидросистемой высокого давления энергии  $E_n$ , получим, что процесс разрушения материала, который начинается при критическом уровне давления  $p_{крт}$ , остается низкопродуктивным, однако с повышением давления его эффективность пропорционально возрастает (рис. 4.122).

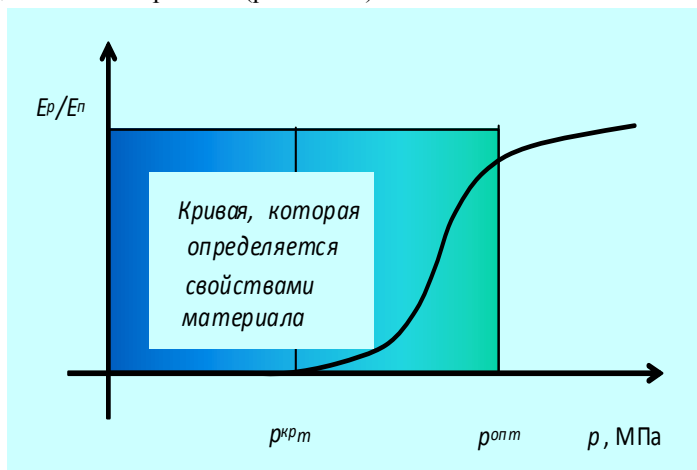


Рисунок 4.122 – Изменение эффективности гидрорезания  $E^p/E^n$ , выраженная в функции давления рабочей жидкости:  $p^{крт}$  – давление, при котором начинается заметное разрушение материала;  $p^{опт}$  – зона оптимального уровня давления

По достижению определенного значения  $p_{опт}$  дальнейшее увеличение давления вызывает замедленное повышение эффективности процесса

вследствие резкого роста энергетических потерь в гидросистеме. Итак, с экономической точки зрения существует некоторая область рабочих давлений, при которых умеренные расходы будут обеспечивать приемлемую производительность процесса.

Можно выделить две схемы взаимодействия струи жидкости с обрабатываемым материалом: 1) перпендикулярно или близко к перпендикулярному натеканию струи на заготовку при отсутствии рабочей подачи; 2) сквозное прорезание с поступательной подачей.

При *перпендикулярном* натекании струи разрушение материала идет в два этапа. Первый характеризуется деформацией поверхности и уплотнением материала в месте натекания без потери массы, второй – лавинообразным ростом скорости вынесения разрушенного материала с образованием и слиянием трещин и формированием воронки разрушения (рис. 4.121, последние фото).

Существенно меняется картина при предоставлении струи движения подачи для выполнения сквозного прорезания: теперь полезную работу выполняет периферийная часть струи, вызывая ударное (зона 1), скользящее (зона 2) и косое (зона 3) разрушение (рис. 4.123). Сама форма создаваемой лунки практически тождественна как для резания материалов чистой струей жидкости, так и для струи, насыщенной абразивными частицами.

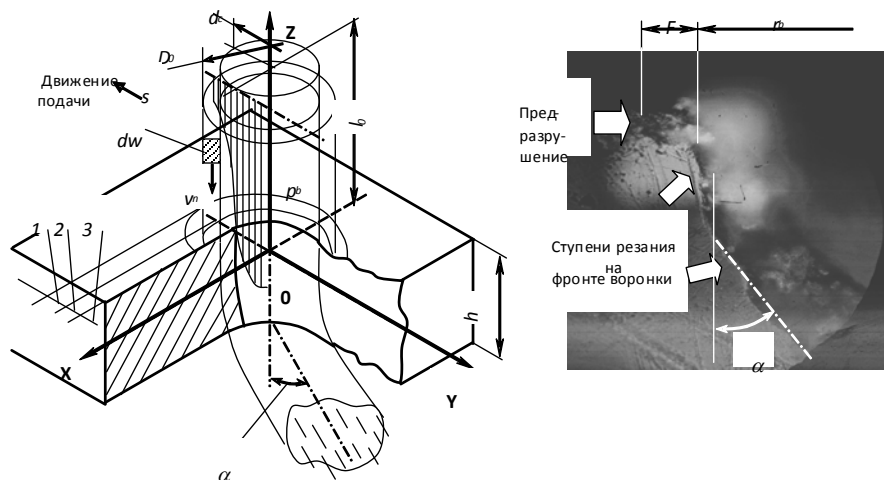


Рисунок 4.123 – Натекание струи на обрабатываемый материал при контурной подаче

В зоне 1 происходит интенсивная бомбардировка отдельными твердыми частицами и жидкости поверхности обработки. Ударное высокочастотное

нагружение приводит к возникновению поверхностных напряжений и к зарождению начальных дефектов, в результате чего появляются клиновые раковины и начальные повреждения (при этом следует отметить, что для смоченного материала работа разрушения уменьшается). Образующиеся трещины и микрополости заполняются полимолекулярным слоем жидкости, молекулы которой стремятся максимально проникнуть в трещину и играют роль расклинователей при росте гидродинамического давления.

Сама зона 1 называется зоной предразрушения. Она характеризуется пониженной прочностью и позволяет при воздействии ядром струи активно деструктурироваться с образованием мелкодисперсной стружки. Постепенно зона предразрушения переходит в зону полного разрушения (зоны 2 и 3), в которой разрушение материала происходит в результате полициклического сжатия отдельных микровыступов поверхности, представляющие собой идеализированные консольные элементы. Было также показано, что резание материала при поступательной подаче происходит ступенчато с образованием элементарных ступеней разрушения, определенным образом ориентированных относительно оси струи. При этом ступени движутся вглубь материала со скоростью, уменьшаются при углублении, а огибающая ступень представляет собой фронт гидроразрушения, угол наклона которого относительно оси струи зависит от толщины материала (при условии полного прорезания материала), его прочности и не превышает  $\pi/12$  независимо от скорости рабочей подачи.

При погружении фронта разрушения скорость движения ступеней уменьшается, и при определенных условиях их движение прекращается. Поскольку было установлено, что значения касательных напряжений, вычисленные для предельных турбулентных слоев на гидравлически шероховатых стенках намного ниже предела прочности на сдвиг обрабатываемого материала, разрушения последнего при сжатии является доминирующим механизмом процесса струйного резания [111].

Установлено, что резание материалов сопровождается образованием деструктивного слоя на поверхности бороздки вследствие того, что приложенная гидродинамическая нагрузка вызывает переориентацию ступеней разрушения, поэтому рост и слияние микротрещин происходит под различными углами. Трещины, зародившиеся в непосредственной близости от центра, ведут к когезионному разрушению материала; другие переориентируются и начинают двигаться вдоль включений (в частности, волокон), образуя зоны расслоений и вызывая, таким образом, адгезионные повреждения. Последние связаны с пространственным положением ступеней разрушения, обусловленным соотношением скорости проникновения струи в обрабатываемый материал и скорости рабочей подачи: чем меньше это соотношение, тем деструкция больше.

Препятствовать адгезионным повреждениям можно, используя специальные приемы ведения обработки (например, используя так называемое резание с поджатием), а также соответствующие устройства и приспособления.

В общем виде структурная схема гидрорезания представлена на рис. 4.124.

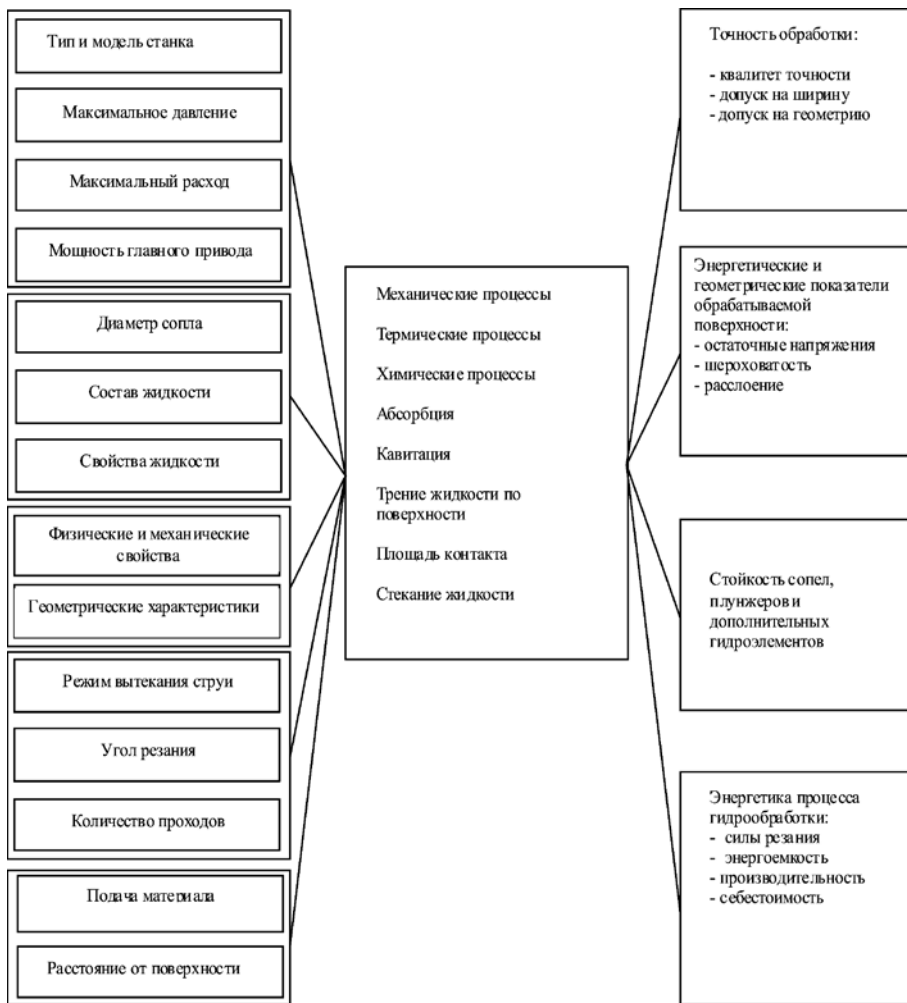


Рисунок 4.124 – Структурная схема гидрообработки

Эффективным есть резание материалов, для которых  $E_p$  остается невысокой, а сам материал имеет однородную структуру. Целесообразна работа с соплами малых диаметров, так как увеличение диаметра сопла будет приводить к значительному увеличению нагрузки на обрабатываемый материал и к снижению производительности процесса. При этом также ухудшается и качество обработки – обработанная поверхность становится более шероховатой, появляются сколы на поверхности и другие дефекты. Давление истечения  $p_b$  должно быть максимально высоким, поскольку в этом случае обеспечивается приемлемая производительность процесса.

Несмотря на то, что в настоящее время существует значительное количество моделей разрушения материалов мощными струйными потоками, которые имеют преимущественно ограниченное применение, в инженерной практике, для предварительных расчетов целесообразно использовать простые эмпирические зависимости, связывающие силу воздействия струи на материал [Н], мощность резания [Вт] и объем изъятых материала [мм<sup>3</sup>/с] с основными параметрами процесса:

$$P_z = 162 \left( \frac{p}{100} \right)^{-1,27} d_c^{2,05} h^{1,1} \left( \frac{\sigma_p}{100} \right)^{-1,27} s^{0,93} \quad (4.36)$$

$$N = 2,129 \left( \frac{p}{100} \right)^{3,36} d_c^{-1,4} h^{-0,5} \left( \frac{\sigma_p}{100} \right)^{-0,94} 10^{-3} \quad (4.37)$$

$$w = 0,106 \left( \frac{p}{100} \right)^{2,4} d_c^{-0,27} h^{-0,35} \left( \frac{\sigma_p}{100} \right)^{-0,75} \quad (4.38)$$

где  $p$  – давление в гидросистеме, МПа;  $d_c$  – диаметр на срезе профиля струйноформирующего сопла, мм;  $h$  – толщина обрабатываемого материала, мм;  $\sigma_p$  – предел прочности, МПа.

Рациональная скорость контурной подачи, мм/с, может быть определена по уравнению:

$$s = 0,106 \left( \frac{p}{100} \right)^{2,4} d_c^{-1,27} h^{-1,35} \left( \frac{\sigma_p}{100} \right)^{-0,75} \quad (4.39)$$

Уже было подчеркнуто, что важную роль играет и расстояние между срезом сопла и обрабатываемой поверхностью. Несмотря на то, что в приведенных формулах этого параметра нет, предполагается, что при резании обеспечивается как перпендикулярность натекания струи на поверхности, так и оптимальное расстояние, мм:

$$l = 99,7 \left( \frac{p}{100} \right)^{0,92} d^{0,9} \quad (4.40)$$

Это расстояние не зависит от обрабатываемого материала и состава жидкости. Его изменение приводит не только к снижению производительности процесса, но и к ухудшению качества резания, изменению геометрических параметров получаемой бороздки. Так, при увеличении расстояния наблюдается пропорциональное увеличение ширины резания и наклона боковых кромок, уменьшение расстояния приводит к появлению неудаленных трещиноватых выступов на поверхности, а резание неоднородных материалов сопровождается существенными расслоениями.

С целью повышения производительности струйное резание может быть модифицировано:

- *изменением свойств рабочего тела (жидкости);*
- *изменением свойств обрабатываемого материала или его состояния в момент обработки (например, за счет создания определенного напряженно-деформированного состояния);*
- *изменением твердых примесей;*
- *устранением некоторых вредных явлений, сопровождающих резание.*

В производственной практике для повышения производительности и эффективности гидрорезания используют насыщенный поток абразивных частиц.

**Насыщение потока абразивными частицами** – самый распространенный способ повышения производительности процесса струйного резания. При этом принципиально меняется механизм отделения микроструи при выполнении обработки, что позволяет данный вид обработки рассматривать как отдельный метод. Лазерное резание предусматривает введение в струю жидкости мелкодисперсных абразивных частиц – кварцевого или гранатового песка, корунда, зерен искусственного алмаза и др. Для этого с соплом устанавливается смесительная камера (рис. 4.125), в которой абразивный порошок подается принудительно или за счет эжекции, а струя, протекая сквозь камеру, захватывает абразивные частицы, разгоняя их до звуковых скоростей. Образующийся поток значительно увеличивается в диаметре – до 0,8-1,0 мм, а введенная в конструкцию калибрующая трубка является своеобразным соплом для предоставления гидроабразивному потоку необходимой компактности.

Механизм взаимодействия потока с обрабатываемым материалом в этом случае принципиально меняется: разрушение осуществляется в основном за счет микрорезания и абразивного разрушения обрабатываемой поверхности. Лазерное резание позволяет обрабатывать широкую гамму материалов – от неметаллов и строительных материалов до высокопрочных конструкционных и инструментальных материалов (рис. 4.126), а также выполнять очистку поверхностей [109]. В Украине накоплен также определенный опыт резания гидроабразивной струей сверхпрочных материалов – карбидных и нитридных керамик, кубического нитрида бора.

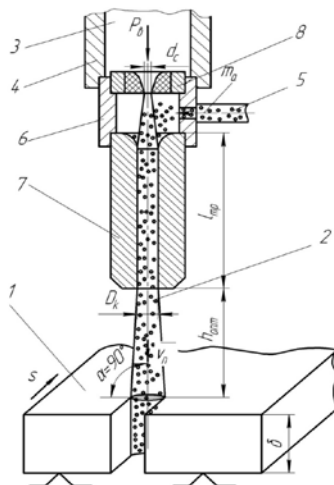


Рисунок 4.125 – Схема технологического налаживания гидрорежущего станка и зоны резания: 1 – обрабатываемый материал; 2 – быстротечная струя; 3 – жидкость высокого давления; 4 – канал высокого давления; 5 – абразив; 6 – смесительная камера; 7 – калибрующая трубка; 8 – сопло



Рисунок 4.126 – Изделия, полученные гидроабразивным способом: листовые детали из уплотнительных материалов (а), изделия из сверхпрочных нитридных (б) и карбидных соединений (д), электроизоляционные материалы (в), титановые и алюминиевые сплавы (г)

Толщина сквозного прорезания конструкционной стали может достигать 250–300 мм [112].

Выбор необходимого абразива осуществляют по экономическим соображениям. Обычно фракцию и тип абразива устанавливают на основании требуемой производительности процесса и качества получаемой поверхности, в частности, ее микрогеометрических параметров. При этом принимаются во внимание конструктивные параметры струйнообразующих элементов, особенности гидрорезательного оборудования. В производственной практике наиболее часто используется кварцевый или гранатовый песок с размером зерна 0,12-0,22 мм (реже – 0,3 мм), что позволяет достигать шероховатости поверхности на уровне 1,6-3,2 мкм по параметру Ra и увеличить производительность процесса при обработке пластиков в 10 раз, а также с успехом выполнять резание металлов, сплавов, камня с объемной скоростью снятия 50-200 мм<sup>3</sup>/с.

Как правило, гидроабразивным резанием удастся достичь точности обработки по 11–12 квалитету, однако применение в гидрорежущих машинах ряда конструктивных усовершенствований позволяет выполнять и более точную обработку – не хуже 8 квалитета точности, формировать мелкие элементы поверхности (на уровне 0,05 мм). В некоторых случаях при применении высококачественного абразива толщиной заготовки более 5 мм удастся избежать неравномерной шероховатости торца, которая обычно увеличивается к низу кромки (рис. 4.127).

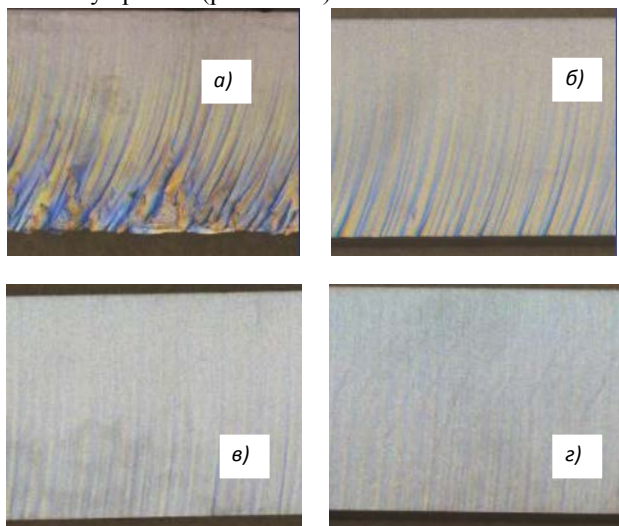


Рисунок 4.127 – Неравномерность шероховатости кромки обрабатываемого материала значительной толщины (материал – Сталь 40Х, толщина – 25 мм); для повышения качества скорость контурной подачи снижена в 4 раза

Невысокая стоимость природных абразивных материалов, высокая производительность делает данный метод наиболее дешевым и распространенным.

Физическая модель резания материала гидроабразивной струей строится на основе анализа отдельного и общего воздействия компонентов струи на процесс эрозии твердого тела [113]. Проходя сквозь камеру смешивания, (рис. 4.128) скоротечный поток жидкости захватывает абразивные частицы и разгоняет их, теряя при этом часть своей кинетической энергии.

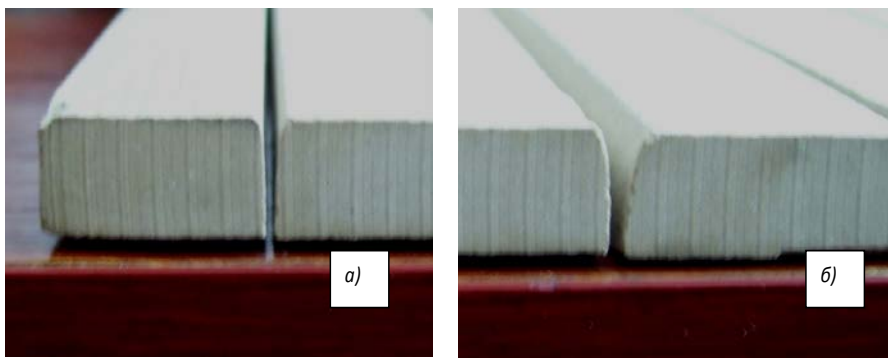


Рисунок 4.128 – Пересечение резания, полученное при обработке мраморной плиты толщиной 15 мм с оптимальным налаживанием (а) и при нарушении нормального хода технологического процесса (б)

Если принять, что скорость истечения жидкости из сопла при коэффициенте расхода  $\mu \rightarrow 1$  и  $p \gg p_a$  зависит от давления гидросистемы  $p$ , и составляет:

$$v = \sqrt{\frac{2p}{\rho}} \quad (4.41)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости, скорость абразивно-жидкостного потока, м/с, после ввода абразива с массовым расходом  $M_a$  скорость упадет и будет составлять:

$$v = \frac{2pf_c}{f_c \sqrt{2p} / p + M_a} \quad (4.42)$$

Смешанный поток направляется к поверхности и выполняет полезную работу.

Сейчас известно, что резание гидроабразивной струей протекает по двум механизмам: механического износа (или процессами микрорезания

отдельными частицами абразива) в результате ударов абразивных зерен, следующих к обрабатываемой поверхности под малыми углами и деформационного повреждения в результате ударов частиц, истекающих на поверхность под значительно большими углами. При этом первый механизм резания приводит к получению поверхности с равномерной глубиной, а второй – с неравномерно распределенной глубиной. Считается также, что относительный вклад каждого механизма в получение суммарной глубины зависит от скорости подачи, причем, если скорость подачи превышает определенное значение, то резонно осуществляется только за счет деформационного повреждения.

Поскольку в процессе разрушения материала гидроабразивной струей полезную работу выполняют преимущественно абразивные быстродвижущиеся частицы (сам поток жидкости, снизив скорость, уже не способен активно участвовать в разрушении материала и вода здесь выступает активизатором абразивного микрорезания и износа, а также средством для удаления продуктов разрушения из зоны резания).

Применяемый абразив (как речной сухой сеяный песок, так и гранатовый сертифицированный песок импортного производства) довольно сильно отличается фракционным составом. Электронно-микроскопическое исследование состава абразива показало, что гранатовый песок имеет более выраженную огранку, остроугольность, с небольшим округлением вершин (как правило, не превышает 5 мкм), что значительно повышает режущие свойства частицы (рис. 4.129) и позволяет использовать абразив после регенерации.

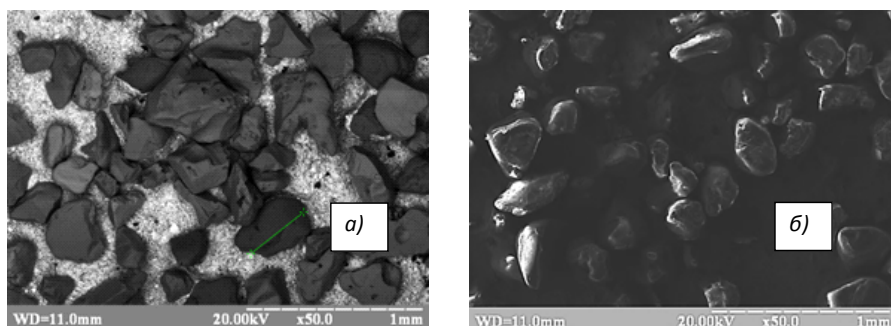


Рисунок 4.129 – Сравнение фракционности гранатового (а) и обычного речного (белого) (б) абразива, используемого для гидроабразивного резания

Размеры отдельных частиц в составах абразива практически полностью подчиняются кривой нормального распределения, однако рассеивания размеров граната меньше,  $\sigma_{гр} = 25$  мкм, в то время как речной песок более

неоднороден:  $\sigma_{pp}=39$  мкм (рис. 4.129). Сравнение торцов резов, полученных при обработке речным и гранатовым абразивом показывает, что последний имеет несомненные преимущества в производительности и в качестве отделки. Таким образом, несмотря на более высокую стоимость, лучшим в использовании является гранатовый песок. Кроме того, он обеспечивает и более стабильные показатели качества, что важно при обработке ответственных и точных деталей.

Поскольку гидроабразивное резание достаточно продуктивно и при обработке заготовок значительной толщины, часто рулоны заготовки раскраивают пакетом. Тем самым уменьшается время на переналадку станка, на выполнение учредительных ходов и многократных повторов рабочих перемещений.

Для определения скорости рабочей подачи достаточно часто используют простое эмпирическое уравнение:

$$s = 0,11 \left( \frac{p}{100} \right)^{1,66} d_c^{0,84} h^{-1,3} \left( \frac{\sigma_m}{100} \right)^{-0,35} \sqrt{d_a} M_a^{0,73} \quad (4.43)$$

где  $p$  – номинальное давление утечки, МПа;  $h$  – толщина обрабатываемого материала, мм;  $\sigma_m$  – предел прочности материала, МПа;  $d_c$  – диаметр абразивных зерен, мм;  $M_a$  – массовый расход абразива, %.

#### **4.8.2. Водолеяное резание**

*Использованием генератора холода или криогенной насадки* позволяет необходимый для обработки абразив получать путем замораживания частиц жидкости (воды) в самой камере смешивания. Существует два способа получения водолеяной струи. Первый предусматривает охлаждение жидкости при подведении к соплу до температуры  $-15...-20$  °С. После выхода из сопла периферийная часть струи состоит из азрированной оболочки, кристаллизуется и к обрабатываемой поверхности поступает уже двухфазный поток – сверхзвуковой поток, насыщенный частицами искусственного абразива (кристаллами льда). По такой схеме сопло оказывается вне зоны действия абразивных частиц, и активного абразивного износа этого дорогого элемента не происходит.

Второй способ предполагает *использование смесительной камеры и сосуда с криогенной жидкостью* – жидким азотом, поступающих в смесительную камеру через дросилирующую шайбу. В этом случае внешняя часть струи превращается в ледяной поток, который далее выравнивается калибровочной трубкой, где и происходит активное перемешивание фаз потока, чем достигается улучшение режущих свойств водолеяной струи.

Инструмент для водолеяного резания подобный инструменту для гидроабразивного резания и приведен на рис. 4.130.

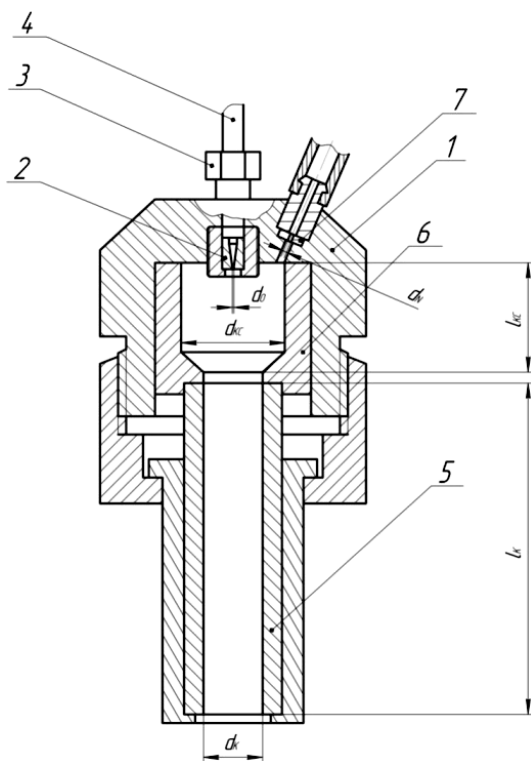


Рисунок 4.130 – Технологический инструмент:

- 1 – корпус; 2 – струйноформирующая насадка; 3 – штуцер; 4 – трубопровод;  
 5 – дополнительная калибровочная втулка; 6 – камера смешения;  
 7 – дроссельная шайба системы подведения жидкого азота

Механизм взаимодействия водоледяной струи с обрабатываемым материалом подобный гидроабразивному резанию, однако после столкновения с препятствием и выполнения работы разрушения частицы льда активно тают, а получаемая стружка не содержит абразивных включений. Итак, отпадает необходимость в сложных сепараторах для разделения и последующей утилизации отходов.

Струйно-ледяное резание применяется также для обработки преимущественно неметаллических материалов и по производительности значительно превосходит резание чистой водой, уступая резанию гидроабразивной струей жидкости; при практическом использовании данного метода объемное снятие материала составляет 40-120 мм<sup>3</sup>/с (рис. 4.131).

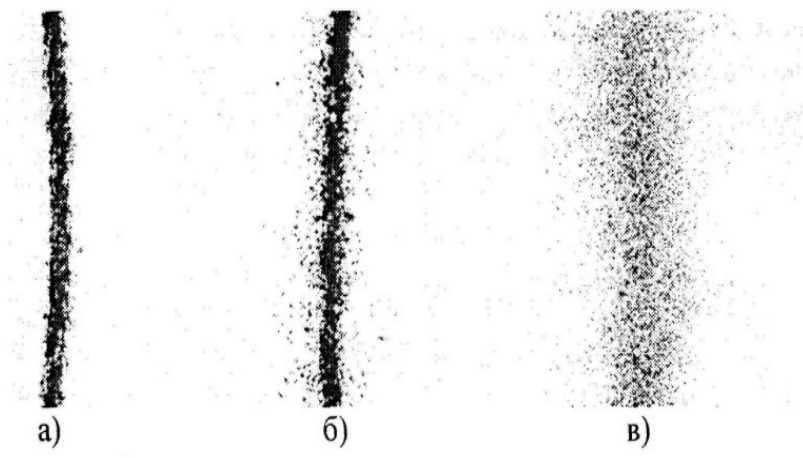


Рисунок 4.131 – Остатки от: а) скоротечной струи жидкости; б) водолеяной струи; в) гидроабразивной струи

Водолеяная струя имеет промежуточную структуру между гидроабразивной струей и струей чистой жидкости (воды). Так, водяная струя имеет активный участок (ядро) по оси струи; гидроабразивная струя представляет собой поток разогнанных абразивных частиц, определенным образом распределенных по сечению струи, а водолеяная струя имеет и активный участок, и разогнанные леяные частицы по периферии одновременно.

С точки зрения получения максимальной глубины резания для данной конструкции водолеяного инструмента существует не только рациональное соотношение диаметров камеры и струи формирующей насадки  $d_k/d_s \approx 5$ , но и рациональное соотношение длины камеры смещения и диаметра отверстия струйноформирующей насадки  $l_{кс}/d_0 \approx 100$  (см. рис. 4.132).

Изучение влияния насыщения скоротечной водяной струи жидким азотом на эффективность водолеяного резания позволило сделать вывод, что максимальная глубина резания достигается при определенной концентрации (%) жидкого азота, и не зависит от твердости обрабатываемого материала. При давлениях утечки воды (от 150 до 300 МПа) для водолеяного инструмента оптимальная концентрация жидкого азота составляет примерно 25%.

При этом для определенного диаметра струйноформирующей насадки при неизменной конфигурации проточной части технологического инструмента соотношение расходов воды и жидкого азота в истекающей струе постоянное и не зависит от давления воды

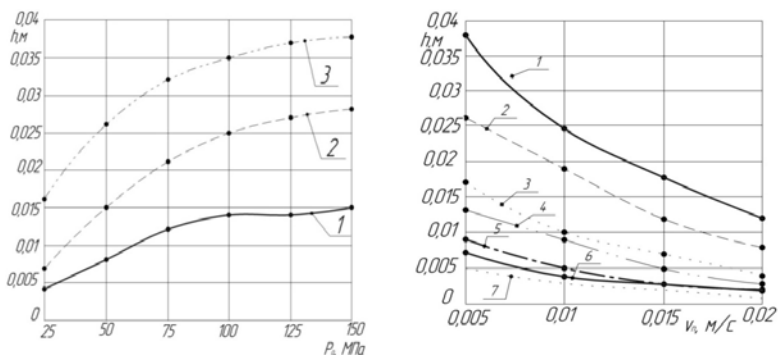


Рисунок 4.132 – Зависимость глубины резания  $h$  (м) от давления воды  $p_0$  (МПа) для разных значений диаметра отверстия насадки  $d_0$  (м): 1 – для  $d_0=0,00020$  м; 2 – для  $d_0=0,00025$  м; 3 – для  $d_0=0,00030$  м (а) и зависимость глубины резания  $h$  (м) от скорости перемещения инструмента  $V_n$ , (м/с) для различных показателей твердости по Шору  $HS_A$ : 1 – для  $HS_A=24$ ; 2 – для  $HS_A=32$ ; 3 – для  $HS_A=42$ ; 4 – для  $HS_A=56$ ; 5 – для  $HS_A=67$ ; 6 – для  $HS_A=78$ ; 7 – для  $HS_A=83$

Это позволяет задавать его только соответствующим, рассчитанным по эмпирической формуле, диаметром дроссельной шайбы:

$$d_N = 3,18 \cdot 10^{-13} \frac{c^{1,42} \cdot p^{0,05}}{d_0^{2,19}}. \quad (4.44)$$

Анализируя изменение глубины резания материала  $h_B$  зависимости от давления утечки, можно сделать вывод, что для процесса водолеяного резания повышать давление более 150 МПа нерационально. Напротив, работа с большими отверстиями сопел позволяет более активно погружаться в материал и получать более глубокое резание. При этом растет также и потребляемая приводом (гидростанцией) мощность.

Оптимальной можно считать скорость подачи, мм/с, рассчитанную по уравнению:

$$s_0 = 0,053 \frac{d_0^{0,09}}{HS_A^{0,17}} \quad (4.45)$$

Таким образом, водолеяное резание низкопрочных неметаллических материалов с успехом конкурирует с водоструйным и гидроабразивным, прежде всего благодаря тому, что не требует сложных систем сепарации отходов, и имеет достаточно высокую (по сравнению со струйным методом) производительность.

### 4.8.3. Основные зависимости струйно-абразивного резания

В настоящее время известно некоторое количество моделей, которые описывают механику разрушения твердого тела струей жидкости высокого давления. Условно такие модели можно разделить на две группы, которые принципиально отражают различие протекающих явлений: модели струйного резания и модели гидроабразивного резания. Первые связывают основные показатели производительности процесса - глубину резания  $h$  или объемное удаление материала  $w$  - с технологическими факторами (например, давлением жидкости  $p_b$ , диаметром струйноформирующего отверстия  $d_c$ ) и свойствами обрабатываемого материала ( $HB$ ,  $T_m$  и др.). Модели второй группы учитывают характеристики абразивных примесей. Модели и первой и второй групп базируются на энергетическом подходе и отражают преобразования кинетической энергии струйного (одно- или многофазного) потока в полезную работу разрушения твердого тела.

Отдельная группа моделей построена на оценке способности струи осуществлять ударно-динамическую нагрузку поверхности обработки, а также на определении условий превышения давления на площадке торможения предела прочности или прочности на сдвиг. Модели гидроабразивного резания также строятся на основе анализа микроразрушения материала от действия совокупности единичных актов контакта абразивного зерна с поверхностью как процесса расходования запасенной кинетической энергии в полезную работу резания.

Свойства материала играют большую роль при резании его гидроабразивной струей. Различные материалы по-разному воспринимают эрозию при косом и поперечном ударе твердых частиц. Для хрупких материалов резание со значительными углами атаки вносит большой вклад в погружение струи по сравнению с резанием с малыми углами атаки. Для пластических материалов удар абразивных частиц при малых углах атаки играет наиболее существенную роль для определения глубины резания. Однако значимость всех зон резания будет одинаковой, если номинально хрупкий материал при определенных условиях ведет себя как пластичный (примером может служить плексиглас).

Если рассматривать бесконечно малую часть гидроабразивной струи, то кинетическая энергия элемента, участвующего в разрушении материала и имеет массу  $(dm_a + dm_b)$ , составит

$$dK = \frac{(dm_b + dm_a)v^2}{2}, \quad dK = (\rho v_b f_b d\tau + M_a d\tau) \frac{v^2}{2} \quad (4.46)$$

Пусть этот элемент влияет на обрабатываемую поверхность в течение времени  $d\tau$ . На определенный промежуток времени будет разрушена масса материала  $dm_m$ . Если  $A$  - работа, затрачивается на разрушение единицы массы, то  $A = adm_m$  - работа, которую необходимо затратить на разрушение массы  $dm_m$ . Считаем, что вся кинетическая энергия расходуется на

разрушение,  $dK=dA$ . Тогда:

$$(\rho v_b f_b + M_a) \frac{v^2}{2} d\tau = adm_m. \quad (4.47)$$

За время  $d\tau$  – обрабатываемый материал переместится на расстояние  $dl_m=s_n d\tau$ , где  $s_n$  – скорость подачи. Обозначив через  $f_p$  площадь сечения сечения и через  $\rho_m$  – плотность материала, найдем  $dm_m$ :

$$dm_m = \rho_m f_p dl_m = \rho_m f_p s_n d\tau. \quad (4.48)$$

Тогда на основе (17) получим:

$$(\rho v_b f_b + M_a) \frac{v^2}{2} = \rho_m f_p s_n a. \quad (4.49)$$

Отсюда работа, затрачиваемая на разрушение единицы массы обрабатываемого материала, будет равняться:

$$a = -\frac{(\rho v_b f_b + M_a) v^2}{2 \rho_m f_p s_n}. \quad (4.50)$$

Определим теперь минимальное давление рабочей жидкости (воды), которое будет достаточным для полного перерезания листового материала толщиной  $h$ . В этом случае сечение будет близким к треугольному с максимальной шириной в верхней части и минимальной (что приближается к нулю) - в нижней части. Если необходимо выполнить сечение длиной  $l_p$ , то при этом необходимо удалить массу материала  $m_m$ :

$$m_m = f_p l_p \rho_m = \frac{1}{2} b_p h s_n \tau \rho_m, \quad (4.51)$$

где  $\tau$  – время резания.

Тогда затраченная работа будет определяться соотношением:

$$A = m_m a = \frac{1}{2} a b_p h s_n \tau \rho_m. \quad (4.52)$$

Если разделить выражение (22) на  $\tau$ , сможем определить необходимую мощность абразивно-жидкостной струи:

$$N = \frac{1}{2} a b_p h s_n \rho_m = f_p s_n \rho_m a \quad (4.53)$$

Поскольку резание выполняется при минимальном расстоянии выходного отверстия калибровочного канала от поверхности обрабатываемого материала, то ширина резания  $b_p$  равна диаметру отверстия калибровочного канала  $d_k$ . Поэтому выражение (4.53) после преобразований примет вид:

$$N = \frac{1}{2} \left( f_b \sqrt{2 p_b \rho} + M_a \right) \left( \frac{2 p_b f_b}{f_b \sqrt{2 p_b \rho} + M_a} \right). \quad (4.54)$$

Это и есть зависимость, позволяющая определить мощность гидроабразивного резания от главных факторов процесса.

#### **4.8.4. Надежность процесса**

Формирование гидроабразивной струи происходит вследствие проявления ряда стохастических или переменных во времени явлений. При этом изменяются его геометрические параметры и режущие свойства, которые ведут к соответствующему изменению исходных показателей качества. В отличие от струйного резания, исходные показатели качества при гидроабразивном резании более «чувствительны» к параметрам процесса, поэтому вопрос обеспечения надежности обработки является весьма актуальным, особенно при обработке ответственных деталей. На самом деле, износ струйноформирующих элементов (сопла и калибровочной трубки) происходит с разной динамикой, и часто для обеспечения надежности процесса пренебрегают их остаточным ресурсом, проводя преждевременную замену с последующим переналадками оборудования. В результате увеличиваются прямые материальные расходы, растет вспомогательное время и время на обслуживание и переналадку, существенно снижается эффективность эксплуатации оборудования. Влияние основных составляющих гидроабразивной системы на производительность, точность и качество обработки объясняется структурной схемой (рис. 4.133).

Явления износа в сопле, калибровочной трубке и в смесительной камере, которые не имеют четкого детерминированного характера 1,2 (рис. 4.133). и обусловлены погрешностями изготовления и сборки элементов, вызывающих возникновение параметрических отказов, которые проявляются в уменьшении более критического уровня производительности процесса  $Q_p$ , снижении точности обработки  $T_e$ , в ухудшении качества поверхности (4,5) и в росте шероховатости (например, по параметру  $R_a$ , мкм), причем время наступления отказа  $T_e$  является математическим ожиданием проявления этого события с определенным уровнем вероятности.

В системе может оказаться и внезапный собственный отказ, обусловленный изменчивостью эжекции абразивных зерен 3, что ведет к перерасходу мощности (когда в зону обработки направляется избыточная масса абразивных частиц) или делает невозможным процесс резания вообще (вследствие неполного прорезывания заготовки). Отказ вызывает и внезапные процессы повреждения самого сопла. Таким образом, формирование собственных или параметрических отказов процесса гидроабразивного резания является следствием ряда случайных процессов, медленно протекающих, связанных с условиями формирования режущей струи и непосредственно определяющих исходные показатели качества обрабатываемой заготовки.

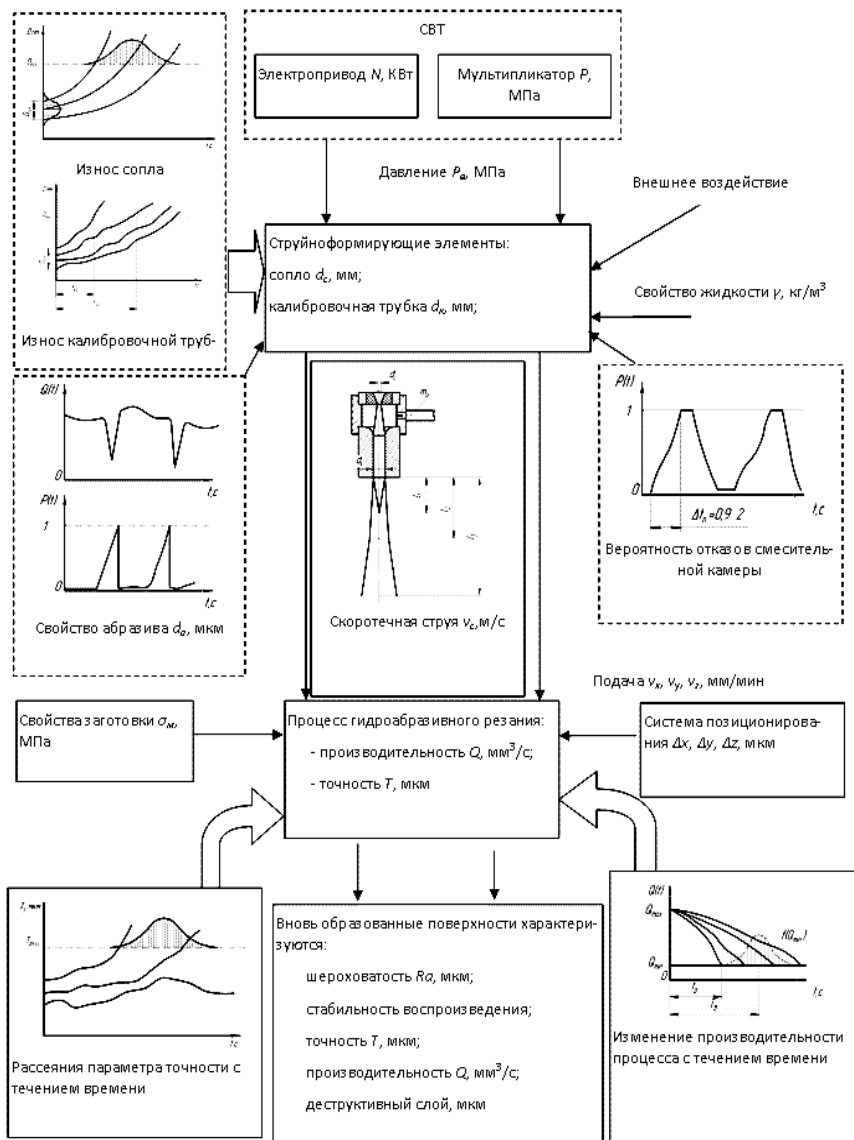


Рисунок 4.133 – Влияние случайных и медленно текущих процессов на надежность процесса гидроабразивного резания

Для гидроабразивного резания отказ – это событие, в результате которого разделительные операции невозможны или их качество не удовлетворяет заказчика. Поскольку реализация процесса гидроабразивного резания предусматривает разделительные операции листовых заготовок, собственный отказ процесса произойдет тогда, когда заготовка не будет прорезана на полную глубину и возникнут участки неполного прорезывания, ( $h_z > h$ ). Таким образом, условием наступления собственного отказа с вероятностью  $f_h(t)$  будет неравенство  $h < h(s_k)$ , где  $S_k$  – скорректированная скорость подачи.

Параметрический отказ произойдет, когда показатели качества обработки, обеспечиваемые процессом, не будут соответствовать допустимым требованиям, то есть

$$R_a > [R_a]; b > b_p + T_b; W > W_p, \quad (4.55)$$

где  $[R_a]$  – допустимая шероховатость поверхности;  $b_p$  – допустимая ширина резания;  $W_p$  – допустимая себестоимость обработки.

С учетом того, что проявление постепенных отказов является следствием протекания процессов износа, вероятность безотказной работы определится как

$P_i(t) = 0.5 + \Phi\left(\frac{X_{\max 1} - a_{01} - \gamma_{cp1}t}{\sqrt{\sigma_{a1}^2 + \sigma_{\gamma1}^2 t^2}}\right)$ , а наступление случайных отказов, исходя из физических закономерностей, подчиняется экспоненциальному закону  $P_p(t) = e^{-\lambda t}$ , уравнение для оценки безотказности процесса с учетом надежности подачи абразива будет иметь вид:

$$P(t) = \left[ 0.5 + \Phi\left(\frac{d_{c\max} - \bar{d}_c - \gamma_c t}{\sqrt{\sigma_{dc}^2 + \sigma_{\gamma c}^2 t^2}}\right) \right] \cdot \left\{ 1 - \left[ 0.5 - \Phi\left(\frac{d_{k\max} - \bar{D}_k - \gamma_{Dk} t}{\sqrt{\sigma_{Dk}^2 + \sigma_{\gamma Dk}^2 t^2}}\right) \right] \left[ 1 - e^{-\lambda_d t} \right] \right\} e^{-\lambda_{cp} P_c(t)}, \quad (4.56)$$

где  $d_{c\max}$  – предельная величина диаметра сопла;  $\bar{d}_c$  – средний диаметр сопла;  $\gamma_c$  – скорость износа сопла;  $\gamma_{Dk}$  – скорость изнашивания калибровочной трубки;  $\sigma_{dc}$  – рассеяние начальных значений диаметров сопел;  $\sigma_{\gamma c}$  – рассеяние параметра скорости износа сопла;  $\sigma_{Dk}$  – рассеяние начальных значений диаметра канала калибровочных трубок;  $\sigma_{\gamma Dk}$  – рассеяние скорости износа канала калибровочной трубки;  $D_{k\max}$  – предельная величина диаметра канала калибровочной трубки;  $\bar{D}_k$  – средний диаметр канала;  $\lambda_D$  – поток отказов калибровочных трубок;  $\lambda_d$  – поток отказов сопел.

Явления износа сопла и калибровочной трубки в общем виде являются независимыми. Они имеют различную интенсивность, поэтому достижение критического уровня каждого из параметров ( $d_c$  и  $D_k$ ) будет происходить в разные моменты времени. Причиной наступления отказа по параметру  $h$  (шириной резания, мм), как правило, одно из событий, устранение которого позволяет обеспечить дальнейший ход процесса до наступления отказа другого элемента, создав тем самым условия для максимального истощения ресурса элементов.

Для определения функциональной связи исходных показателей качества обработки с параметрами гидроабразивной струи примем во внимание, что средняя скорость истечения жидкости из сопла  $v_c$ , м/с, определяется по (4.57), а длина компактной (начальной) части струи по (4.58).

$$v_c = a \sqrt[n-1]{\frac{2}{1-n} \left[ \left( \frac{p}{B} + 1 \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]} \quad (4.57)$$

$$l_{ps} = C \frac{\eta d_c \rho}{\mu} \sqrt{\frac{2}{\rho} p} \quad (4.58)$$

Поскольку обычно мультипликаторная система работает с полным исчерпанием полезной мощности, увеличение отверстия сопла сопровождается падением давления жидкости  $p$  и, соответственно, снижением скорости движения зерен  $v_a$ . При этом уменьшается режущая способность струи, меняются условия эжекции абразивных частиц, растет ширина резания с  $b_o$  до  $b_i$ . Обработка будет невозможной по достижению  $h_{крит}$  и  $b_{max}$ . Расчет условий формирования и течения потока жидкости позволил установить, что максимальный размер калибровочной трубки, при котором сквозное прорезание материала прекращается, определяется соотношением:

$$D_{max} \leq \frac{h_{max} D_n}{h_0} = \frac{(\rho v_c f_c)}{2s_k \tau \rho \cdot a h_0} \quad (4.59)$$

Таким образом, параметрический отказ процесса гидроабразивного резания проявляется в износе проточной части калибровочной трубки, струйноформирующего сопла, что ведет к увеличению ширины резания  $b_r$ , снижению глубины резания  $h$  и к ухудшению качества кромки.

Распределение времени наступления отказа как случайной величины может быть аппроксимировано законом Вейбула-Гнеденко при условии, что период устойчивости определяется как:

$$T_{CT1} = \frac{d_c^{max} - (d_{c+3\sigma_d})}{\gamma_c + 3\sigma_\gamma} \quad (4.60)$$

#### **4.8.5. Эффекты управляемого разрушения материалов на основе интеграции факторов влияния**

Введение в зону резания дополнительной энергии значительно расширяет технологические возможности метода струйного резания, поскольку позволяет выполнять не только формообразование, но и при необходимости формировать структуру поверхностного слоя. Однако в этом случае струя жидкости уже непосредственно не является носителем энергии, затрачиваемой на разрушение самораспространяющегося синтеза.

Вообще тенденция интеграции различных видов и даже методов обработки присуща большинству секторов рынка промышленного оборудования. Обычно выполняются обобщения механического и термического воздействий (например, обработка труднообрабатываемых материалов режущим клином при предыдущем нагреве поверхности плазмой или лазером, выполнение операций прошивки листовой заготовки с использованием сканирующего лазера), реже – соединением потоков жидкости и других физико-химических эффектов (например, средств самораспространяющегося синтеза с одновременным тушением струей жидкости высокого давления нужной фазы преобразования и т.д.). Интеграция воздействий имеет и другую положительную сторону: появляется принципиально новое оборудование, способное решать задачи обработки как отдельно каждым из имеющихся автономных средств, так и их комбинированием.

Так, рассматривая возможные комбинации эффектов при обработке листовых материалов, можно сделать вывод, что перспективным является использование эффектов теплового (в частности, оптического) и струйного воздействий, на что и было обращено внимание ряда компаний.

***Вопросы для самостоятельного контроля***

1. Поясните суть процесса приспособляемости при алмазном шлифовании ПСТМ.
2. Каковы механизм съема припуска и основные условия эффективной обработки ПСТМ?
3. В чем состоит суть управляемого процесса шлифования? Каковы основные условия для его практической реализации?
4. На каких законах основан процесс электрохимического удаления связки круга?
5. В чем состоит отличие подходов к стабилизации управляющего воздействия на РПК при различных схемах шлифования?
6. Назовите основной недостаток способа стабилизации управляющего воздействия на РПК путем изменения технологического напряжения.
7. Назовите пять основных принципов, положенных в основу системы электрохимического формообразования профилей кругов.
8. В чем состоят основные предпосылки использования дополнительных механических колебаний в управляемом процессе шлифования ПСТМ?
9. Назовите основные отрицательные факторы при использовании механических колебаний с инфра – и ультразвуковыми частотами?
10. В чем состоит суть 3D моделирования процессов шлифования?
11. Виброабразивная обработка ВиАО; сущность процесса и назначение.
12. Основные параметры процесса ВиАО.
13. Технологические возможности метода ВиАО. Назвать операции, выполняемые методом ВиАО.
14. Инструментальное обеспечение ВиАО (обрабатывающая среда (ОС)); общая характеристика ОС.
15. Оборудование для выполнения ВиАО; наименование и общая характеристика.
16. Назначение технологической жидкости (ТЖ) при ВиАО; общая характеристика состава ТЖ.
17. Кинематические параметры режима ВиАО; понятия: дорезонансный, резонансный, зарезонансный режим работы.
18. Вспомогательное (дополнительное) технологическое оснащение; общая характеристика и назначение.
19. Назначение и характеристика вибровозбудителя (вибратора).
20. Назвать примеры операций ВиАО некоторых типов деталей.
21. Условия для реализации высокой эффективности процесса МАО?
22. Какие преимущества метода МАО перед традиционными методами финишной обработки Вам известны.

23. Какую роль выполняет магнитно-абразивный порошок при МАО и от чего зависят его эксплуатационные характеристики?
24. В чем принципиальное отличие схем для реализации МАО с большими и малыми рабочими зазорами?
25. Какие схемы МАО можно рекомендовать для обработки деталей простой формы?
26. Какие классы магнитно-абразивных порошков применяют при МАО и в чем их преимущества и недостатки?
27. Как оценивают эксплуатационные характеристики магнитно-абразивных порошков?
28. Какие технологические параметры процесса МАО являются наиболее значимыми при решении задач полирования и упрочнения деталей?
29. Какие параметры предварительной обработки поверхностей деталей надо учитывать при выборе размера частиц магнитно-абразивных порошков для МАО и как они определяются?
30. Какие скорости обработки являются критическими при реализации метода МАО на станках, использующих магнитную систему с малыми рабочими зазорами.
31. Какие силы действуют на частички магнитно-абразивных порошков в процессе МАО?
32. В каких условиях целесообразно выполнять МАО концевое режущего инструмента?
33. Какие остаточные напряжения формируются в поверхностном слое деталей в процессе МАО и от чего зависит их величина и глубина распространения?
34. В чём сущность и преимущества процесса алмазно-искрового шлифования?
35. Развитость алмазных зёрен и её влияние на процесс микрорезания.
36. Какие критерии характеризуют особенности взаимодействия алмазных кругов с обрабатываемым материалом?
37. Отличительные особенности износа алмазных кругов и зёрен при АИШ.
38. Чем характерна оценка качества твёрдых сплавов при АИШ?
39. Объясните, почему алмазное электрохимическое шлифование (АЭХШ) относится к интегрированным технологическим процессам механической обработки?
40. Приведите и объясните кинематическую схему процесса АЭХШ: по схеме жесткого шлифования; по схемам упругого шлифования с помощью пружины, рычага и гидравлического устройства.
41. Объясните влияние схемы шлифования на динамическое состояние элементов обрабатывающей системы.

42. Приведите и объясните схемы зоны контакта «круг - обрабатываемая деталь» для: пластичного материала; хрупкого материала.

43. Охарактеризуйте параметры рабочего межэлектродного зазора в условиях шлифования алмазными кругами с большими нормальными давлениями.

44. Охарактеризуйте роль электролита и процесса его гидродинамики в условиях электрохимической размерной обработки (ЭХРО) и, в частности, силового ЭАХШ.

45. В чем состоит особенность кинетики растворения твердых сплавов и сталей в условиях электрохимической размерной обработки (ЭХРО) и, в частности, силового ЭАХШ?

46. Чем объясняется взаимосвязь рабочего напряжения и плотности тока при АЭХШ твердых сплавов кругами с различными концентрациями и зернистостью при использовании традиционных (до 6 кгс/см<sup>2</sup>) и больших (до 22 кгс/см<sup>2</sup>) нормальных давлений?

47. Охарактеризуйте роль электроэрозии при силовом АЭХШ твердых сплавов.

48. Каковы особенности механизмов разрушения обрабатываемого материала при силовом АЭХШ твердых сплавов?

49. Охарактеризуйте сопутствующие механизмы разрушения обрабатываемого материала.

50. Объясните физическую сущность процесса силового (глубинного) электроалмазного шлифования.

51. Объясните влияние нормального давления (поперечной подачи) на производительность процесса и износостойкость алмазных кругов при АЭХШ.

52. Охарактеризуйте формирование макро- и микрорельефа обработанной поверхности при силовом АЭХШ твердых сплавов.

53. Охарактеризуйте влияние нормального давления на шероховатость поверхности при силовом АЭХШ твердых сплавов.

54. Каковы механизмы влияния поперечной подачи и процесса выхаживания на формирование остаточных напряжений в поверхностном слое твердых сплавов после АЭХШ?

55. Какова зависимость влияния условий силового АЭХШ на стойкость твердосплавных инструментов?

56. В чем состоят конструктивные особенности и принцип работы устройств для силового АЭХШ?

57. Охарактеризуйте технологические возможности и области применения силового АЭХШ.

58. Что определяет экономическую эффективность процесса силового АЭХШ?

59. Приведите классификацию способов и методов струйной обработки материалов.

60. В чем заключается сущность гидроструйного резания материалов? Какое главное условие протекания процесса?

61. Охарактеризуйте основные отличия гидроструйного и гидроабразивного резания.

62. Какие преобразования энергии происходят в зоне струйного воздействия? Как обеспечивается энергетическая эффективность струи?

63. Объясните необходимость смесительной камеры в системах гидроабразивного резания.

64. Объясните различие производительности процесса гидроабразивного резания при обработке, склонного к хрупкому разрушению и вязких материалов.

65. По каким основным механизмам происходит съем материала в зоне резания?

66. Какова роль криогенной жидкости при водолеяном резании?

67. Может эффективно происходить лазерно-струйное резание при использовании непрерывного лазера?

**Список литературы к главе 4**

1. Электронный ресурс / <http://www.wing.com.ua/content/view/4513/66/>.
2. Инверсия структурной приспособляемости в процессах финишной алмазной обработки / Костецкий Б.И., Шульман А.П., Ляшко В.А., Носовский И.Г. // Синтетические алмазы - ключ к техническому прогрессу. - Киев, 1977. - Ч.1. - С. 273-279.
3. Грабченко А.И. Расширение технологических возможностей алмазного шлифования. - Харьков: Вища шк, 1985. - 184 с.
4. Семко М.Ф., Грабченко А.И., Ходоревский М.Г. Алмазное шлифование синтетических сверхтвердых материалов. - Харьков: Вища школа, 1980. - 192 с.
5. Рабочие процессы высоких технологий в машиностроении: Уч. пособие / Под. ред. А.И. Грабченко. - Харьков: ХГПУ, 1999. - 436 с.
6. Гусева Л.Ю. Автоматизация создания режущего микропрофиля на вершинах зерен крупнозернистых алмазных кругов // Российский научно-технический журнал "Инструмент и технологии" - 2000. - Вып. 1. - С. 20-21.
7. Кисилев М.Г., Минченя В.Т. Применение ультразвука для формирования алмазосного слоя на рабочей поверхности ограночных дисков // Инструментальний світ. - 2002. - № 1(13). - С. 30-31.
8. Марков А.И. Ультразвуковое резание труднообрабатываемых материалов. - М.: Машиностроение, 1968. - 367 с.
9. Марков И.А. Ультразвуковая обработка материалов. - М.: Машиностроение, 1980. - 237 с.
10. Федорович В.А. Способы шлифования с комбинированным управлением режущим рельефом кругов // Вестник ХГПУ. - Харьков: ХГПУ. - 1999. - Вып. 45. - С. 26-28.
11. Кумабэ Д. Вибрационное резание. Пер. с яп. С.Л. Масленникова / Под ред. И.И. Портнова, В.В. Белова. - М.: Машиностроение, 1985. - 424 с.
12. Робочі процеси високих технологій у машинобудуванні: підручник для студентів вищих навчальних закладів / Грабченко А.І., Верезуб М.В., Внуков Ю.М. та ін. за редакцією А.І. Грабченка. - Житомир, ЖДТУ, 2003 р. - 451 с.
13. Грабченко А.И. Повышение производительности шлифования ПСТМ с управлением режущим рельефом круга / Грабченко А.И., Пыжов И.Н. // Сверхтвердые материалы. - 1982. - № 5. - С. 34-37.
14. Вибрационное резание: Пер. с яп. С.Л. Масленникова / под ред. И.И. Портнова, В.В. Белова. - М: Машиностроение, 1985. - 424 с.
15. Грабченко А.И. Роль характеристики алмазного круга в комбинированных процессах алмазного шлифования ПСТМ / Грабченко А.И., Пыжов И.Н., Алексеенко Д.М. - Вісник СумДУ. Серія «Технічні науки», №3, т.1, 2010. - с. 38-48.

16. Федорович В.А. 3D моделирование вибрационного алмазного шлифования / В.А. Федорович, И.Н. Пыжов, С.С. Кронов // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: 2013. – Вып. 83. – С. 269-276.
17. Грабченко А.И. 3D моделирование алмазно-абразивных инструментов и процессов шлифования / А.И. Грабченко, В.Л. Доброскок, В.А. Федорович – Х.: НТУ «ХПИ», 2006. – 364 с.
18. Криворучко Д.В. Моделирование процессов резания методом конечных элементов: методологические основы: монография / Д.В. Криворучко, В.А. Залого. Под общей редакцией В. А. Залого – Сумы: Университетская книга, 2012. – 450 с.
19. Новиков Н.В. Исследование распространения усталостных трещин в монокристаллах синтетических алмазов / Н.В. Новиков, Л.П. Примак, А.Л. Майстренко, А.Д. Ващенко // ДАН СССР. –1981 –256 с.
20. Бабичев, А.П., «Основы вибрационной технологии» // Бабичев А.П., Бабичев И.А. – Ростов н/Д.: Издательский центр ДГТУ, 2008. – 694 с.
21. Гончаревич, И.Ф., «Теория вибрационной техники и технологии» / И.Ф. Гончаревич, К.В. Фролов. – М.: Наука, 1981. – 319 с.
22. Лубенская, Л.М. «Основы вибрационной технологии» // Лубенская Л.М., Калмыков М.А., Ясунин С.Н. – уч. пособие, Луганск, 2009. – 284 с.
23. Коновалов Е.Г., Шулев Г.С. Чистовая обработка деталей в магнитном поле ферромагнитными порошками. – Мн.: Наука и техника, 1967. – 125 с.
24. Барон Ю.М. Технология магнитно-абразивной обработки. – Л.: Машиностроение, 1975. – 128 с.
25. Барон Ю.М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов. Л.: Машиностроение, 1986. – 176 с.
26. Сакулевич Ф.Ю., Минин Л.К., Олендер Л.А. Магнитно-абразивная обработка точных деталей. – Мн.: Высшэйшая школа, 1977. – 288 с.
27. Сакулевич Ф.Ю., Кожуро Л.М. Объемная магнитно-абразивная обработка. – Мн.: Наука и техника. – 1978. – 168 с.
28. Сакулевич Ф.Ю. Основы магнитно-абразивной обработки. – Мн.: Наука и техника, 1981. – 328 с.
29. Оликер В.Е. Порошки для магнитно-абразивной обработки и износостойких покрытий. – М.: Металлургия, 1990. – 176 с.
30. Оликер В.Е. Применение, классификация и тенденции развития абразивной обработки ферромагнитными порошками. – Киев: ИПМ АН УССР. Препринт, 1984. – 66 с.
31. Майборода В.С. Магнитно-абразивная обработка специальных деталей. Диссертация ... канд. техн. наук. – Киев, – 1988. – 170 с.

32. Устройство для магнитно-абразивной обработки: А.с.409840 СССР, М.Кл. В 24В31/10, В 23р 1/00 /Д.Я. Горфинкель, Г.А. Амнуэль. – №1795012/25-8; Заявлено 29.05.72; Опубл.05.01.74, Бюл. №1. – 2 с. ил.
33. Пат.3898769 США, МКИ В24В 5/22, В24Д 3/00, В24Д 17/00. Method and apparatus for centers magnetic-abrasive polishing: Пат.3898769 США, МКИ В24В 5/22, В24Д 3/ 00, В24Д 17/ 00/ В .G. Makedonski, A.D. K ochemidov, I.M. Dumanov, S.G. Payakov – № 461,440; Заявлено 12.03.73; Опубл. 16.04.74; Бюл. № 2 – 6 с.ил.
34. Пат.2.261.098 Франция. Pисpositif de profilage de disques de moujage. / Josef R ibas//Bulletin O fficiel d e la P ropriete I ndustrielle. – 1975. – №42. – P.11994.
35. Устройство для магнитно-абразивной обработки тел вращения: А.с.814684 СССР, М.Кл. В 24в 31/10 / Ю.С. Кочура, А.А. Мизери. – №2785726/25-8; Заявлено 27.06.79; Опубл. 23.03.81, Бюл. №11. – 3 с.ил.
36. Устройство для магнитно-абразивной обработки: А.с.931414 СССР, М.Кл. В 24В 31/10 / Ю.А. Базарнов, Ф.Ю. Сакулевич, В.В. Смоляк. – №2832648/25-8; Заявлено 26.10.79; Опубл. 30.05.82, Бюл. № 20. – 4 с.ил.
37. Устройство для обработки ферромагнитными порошками в магнитном поле: А.с.606716 СССР, М.Кл. В 24В 31/10 / Л.Г. Усаков. – № 2429755/25-8; Заявлено 14.12.76; Опубл. 15.05.78, Бюл. №18. – 3 с.ил.
38. Приспособление для магнитно-абразивной обработки: А.с.655515 СССР, М.Кл. В 24В 31/10/ Ю.С. Кочура, А.А. Мизери и др. – №2562111/25-8; Заявлено 30.12.77; Опубл.05.04.79, Бюл. №13. – 2 с.ил.
39. Устройство для абразивной обработки деталей ферромагнитными порошками в магнитном поле: А.с. 657978 СССР, М.Кл. В 24в 31/10/ Л.Д. Ключников, Ф.Ю. Сакулевич. – № 1238565/25-8; Заявлено 02.05.75; Опубл.02.02.77, Бюл. №26. – 2с.ил.
40. Yamaguchi N itomi, S hiomura T akeo N ihon K ikai ga kkaï r onbunshu. (Магнитно-абразивная обработка внутренних поверхностей труб.) // Jap.Soc.Mech.Eng.C. – 1995. – 61. – №591. – P.4470-4475.
41. Yamaguchi N itomi, S hiomura T akeo, K aneko Takehiro A new internal finishing process by applying magnetic abraive finishing through the use of the pole rotation system. –Processing principle with a few finishing characteristic. / /Int. J. Jap. Soc. Precis.Eng. – 1995. – 29. – № 4. – P 309-310.
42. Спосіб магнітно-абразивної обробки: Патент України на винахід №18814, М.Кл. В24 В31/112 / В.С.Майборода, А.В.Андронов, В.Я. Верменко та ін. Приоритет 29.10.93; Опубл. 25.12.97, Бюл. №6 – 2с.ил.
43. Патент України на винахід № 77792 МПК В24В 31/112 (2006.01). Верстат з ЧПК для магнітно-абразивної обробки лопаток ГТД/В.М. Гейчук, В.С. Майборода, А.А. Лисенко; заявник та патентовласник. – Національний технічний університет України "КПІ". - 20041109475; заявл. 19.11.2004; опубл. 15.01.2007; бюл. №1.

44. Патент DE 102009015158 B 24 B 31/112 (2006.01) Werkzeugmaschine zur magnetabrasiven Bearbeitung/Geichuk Volodymyr, Maiboroda Victor, Vyelyayev Oleksiy; заявник та патентовласник ZOM Oberflächenbearbeitung GmbH. № 10 2009 015 158.3; заявл. 26.03.2009; опубл. 30.09.2010.

45. Патент України на винахід № 92513 МПК В24В 31/112 (2006.01); Пристрій для магнітно-абразивної об'ємної обробки / В.М. Гейчук, В.С. Майборода, Гаврушкевич А.Ю.; заявник та патентовласник. – Національний технічний університет України "КПІ". – № а200810761; заявл. 29.08.2008; опубл. 10.11.2010 р.; бюл. № 21.

46. Майборода В.С. Основы створення і використання порошкового магнітно-абразивного інструменту для фінішної обробки фасонних поверхонь: дис. ... докт. техн. наук: 05.03.01 / Майборода Віктор Станіславович. – К., 2001. – 404 с.

47. Степанов О.В. Исследование процесса формирования магнитно-абразивного порошкового инструмента для обработки деталей сложной геометрической формы: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.06 / Степанов Олег Васильевич. – Киев, 1997. – 145 с.

48. Магнитно-абразивная обработка лопаток на установке типа кольцевой ванны / Т.Я. Гридасова, В.С. Майборода, В.Я. Шлюко и др. // Авиационная промышленность. – 1985. – №8. – с.19-20.

49. Майборода В.С. Магнитно-абразивная обработка специальных деталей. Диссертация ... канд. техн. наук. – Киев, – 1988. – 170 с.

50. Ефремов В.Д., Ящерицын П.И. Технологическое обеспечение качества рабочих кромок инструмента и деталей. Мн.: БАТУ. – 1997. – 251 с.

51. Биргер И.А. Остаточные напряжения. – М.: МАШГИЗ, 1963. – 232 с.

52. А.с. 494130. Способ абразивной обработки металлов / М.Ф. Семко, Н.К. Беззубенко, Н.С. Сальтевский, А.Т. Калашников (СССР). – №1828222/25-8; Заявлено 12.09.72; Опубл. 25.08.76 // Открытия. Изобретения. – 1976. – №31. – С. 170.

53. Грабченко А.И., Красильников Е.В. Исследование субмикрорельефа алмазных зерен // Резание и инструмент. – 1972. – Вып. 5.

54. Креймер Г. С. Прочность твердых сплавов. – М.: Metallurgia, 1971. – 248 с.

55. Ландау Л.Д. О равновесной форме кристаллов // Сб., посвящ. 70-летию акад. А.Ф. Иофе. – М.: Изд-во АН СССР, 1950. – Т. 44. – С. 49–61.

56. Свердлова Б.М., Гладких Л.И., Фукс М.Я. и др. Остаточные напряжения в шлифованных изделиях из многофазных материалов // Физико-химическая механика материалов. – 1972. – Вып. 4. – С. 24–28.

57. Свердлова Б.М., Фукс М.Я. Особенности формирования остаточных напряжений в гетерофазных материалах // Сверхтвердые материалы. – 1981. – № 3. – С. 52–56.

58. Семенов А.П., Поздняков В.В., Крапошин Л.Б. Трение и контактное взаимодействие графита и алмаза с металлами и сплавами. – М.: Наука, 1974. – 108 с.
59. Узунян М.Д. Алмазно-искровое шлифование твердых сплавов. – Харьков: НТУ “ХПИИ”, 2003. – 359 с. – Русск. яз.
60. Фукс М.Я., Беззубенко Н.К., Свердлова Б.М. Состояние поверхностного слоя материалов после алмазной и эльборово́й обработки. – К.: Вища школа, 1979. – 160 с.
61. Семко М.Ф. Высокопроизводительное электроалмазное шлифование инструментальных материалов/ М.Ф. Семко, Ю.Н. Внуков, А.И. Грабченко и др. // Киев: Вища школа. Головное изд-во, 1979. – 232 с.
62. Залога В.А. Исследование процесса высокопроизводительного электроалмазного шлифования инструментальных материалов кругами из АСБ. Диссертация ... канд. техн. наук. – Харьков, – 1974. – 178 с.
63. Семко М.Ф. Электроалмазное шлифование инструментальных материалов. М.Ф. Семко., А.И. Грабченко, Н.В. Левченко, А.Ф. Раб // Киев, Вища школа. Головное изд-во, 1974.
64. Яковенко Л.Д. Электроалмазное шлифование и заточка металлорежущих инструментов. / Л.Д. Яковенко // Львов, Каменяр, 1971.
65. Saljes E. Ursachen und Vinderung von Vrrang Schwinnggen. / Saljes E. // Industrie-anzeiger, 1953.75.
66. Кудинов В.А. Динамика станков. / В.А. Кудинов // М., Машиностроение, 1967.
67. Флид М.Д. Влияние жесткости и вибрационных характеристик заточных станков на процесс заточки твердосплавного инструмента. / М.Д. Флид // В кн.: Вопросы заточки металлорежущего инструмента. М., Моск. дом научн.-техн. пропаганды им. Дзержинского, 1967.
68. Палей М.М. Волнистость поверхности при плоском шлифовании, / М.М. Палей // Станки и инструмент, 1958, № 9.
69. Ящерицын П.И. Повышение качества шлифованных поверхностей и режущих свойств абразивно-алмазного инструмента. / П.И. Ящерицын, А.Г. Зайцев // Минск, Наука и техника, 1972.
70. Шульман П.А. Качество поверхности, обработанной алмазами. / П.А. Шульман, Ю.И. Созин, И.Ф. Колесниченко, А.С. Вишне́вский // Киев, Техніка, 1972.
71. Захарченко В.П. Приспособление для автоматической стабилизации прижимного усилия при алмазном шлифовании / В.П. Захарченко, Л.Н. Семенов, Н.П. Комышан // Синтетические алмазы, 1969, №3.
72. Семко М.Ф. Основы алмазного шлифования. / М.Ф. Семко, А.И. Грабченко, А.Ф. Раб, М.Д. Узунян // Киев, Техніка, 1975.
73. Семко М.Ф. Физические основы резания инструментом из новых синтетических поликристаллических алмазов и области их эффективного

применения. / М.Ф. Семко // Резание и инструмент. Харьков, Изд-во Харьк. гос. ун-та, 1971, вып. 4.

74. Семко М.Ф. Особенности процесса резания инструментами из синтетических алмазов крупных размеров. / М.Ф. Семко // В кн.: Синтетические алмазы в промышленности. Киев, Наукова думка, 1974.

75. Технология машиностроения. Исследования в области электрофизических и электрохимических методов обработки материалов. / Тула, Изд-во Тульск. политехи, ин-та, 1971, вып. 21.

76. Электрохимическая обработка металлов / Под ред. Мороза И.И. // М., Машиностроение, 1969.

77. Де Барр А.Е. Электрохимическая обработка. / А.Е. Де Барр, Д.А. Оливер // М. // Машиностроение, 1973.

78. Семко М.Ф. Некоторые вопросы формирования поверхности при электролитическом шлифовании. / М.Ф. Семко, Н.В. Левченко // Алмазы, 1970, вып. 2.

79. Мороз И.И. Электрохимическая обработка металлов. / И.И. Мороз, Г.А. Алексеев, О.А. Водяницкий // М., Машиностроение, 1969.

80. Седыкин Ф.В. Особенности электрохимической обработки фасонной полости на малых зазорах. / Ф.В. Седыкин, В.С. Усов, Ю.С. Тимофеев, В.И. Филин // Технология машиностроения. Исследования в области электрофизических и электрохимических методов обработки. Тула, Изд-во Тульск. политехи, ин-та, 1971, вып. 13.

81. Саушкин Б.П. О некоторых явлениях в зазоре при электрохимической обработке импульсами тока. / Б.П. Саушкин, Г.Н. Корчагин, Г.В. Кулешов // Электронная обработка материалов, 1974, № 1 (55).

82. Гродзинский Э.Я. Некоторые вопросы механизма съема металла при абразивной электрохимической обработке. / Э.Я. Гродзинский, Л.И. Ломоносов, М.В. Козлов, Л.С. Зубатова // Электрофизические и электрохимические методы обработки, 1973, вып. 3.

83. Седыкин Ф.В. Некоторые методологические проблемы электрохимической размерной обработки. / Ф.В. Седыкин, В.И. Филин // Технология машиностроения. Исследования в области электрофизических и электрохимических методов обработки металлов. Тула, Изд-во Тульск. политехи, ин-та, вып. 13.

84. Давыдов А.Д. Некоторые вопросы электрохимической размерной обработки сплавов. / А.Д. Давыдов, В.Д. Кашеев // Электронная обработка материалов, 1968, № 1.

85. Петров Ю.Н. Исследование процесса электрохимической размерной обработки металлов. / Петров Ю.Н., Мочалова Г.Л. // В кн.: Электрохимическая обработка металлов. Кишинев, Штиинца, 1971.

86. Левин А.И. Кинетика анодного растворения при электрохимической обработке сплава ВК8. / А.И. Левин, М.А. Евсеева, А.В. Нечаев // В кн. Электрохимическая обработка металлов. Кишинев, Штиинца, 1971.

87. Левин А.И. О механизме растворения сплава ВК8 в процессе электрохимической обработки. / А.И. Левин, М.А. Евсеева, А.В. Нечаев, Ю.П. Соловьев // Электронная обработка материалов, 1969, № 4.

88. Паршутин В.В. Влияние химического состава электролита на процесс анодного растворения твердых сплавов типа ВК. / В.В. Паршутин // В кн.: Электрохимическая обработка металлов. Кишинев, Штиинца, 1971.

89. Коганов И.А. Исследование поведения твердых сплавов при электрохимической обработке вращающимся кругом - электродом. / И.А. Коганов, Н.Н. Фролов, Е.К. Шпатов // В кн.: Размерная электрохимическая обработка металлов. Тула, Изд-во газ. Коммунар, 1969.

90. Паршутин В.В. Выбор электролита для электрохимической размерной обработки твердых сплавов. / В.В. Паршутин, Ю.Н. Петров // Электронная обработка материалов, 1969, № 6.

91. Паршутин В.В. Особенности анодного растворения твердых сплавов типа ВК в нитратно-щелочных электролитах. / В.В. Паршутин, Ю.Н. Петров, А.И. Лоскутов // Электронная обработка материалов, 1970, № 3.

92. Грабченко А.И. Роль некоторых факторов в удалении припуска в процессе электроалмазного шлифования. / А.И. Грабченко, Н.В. Левченко, В.А. Залого // Резание и инструмент. Харьков, Изд-во Харьк. гос. ун-та, 1973, вып. 8.

93. Гостев В.В. Характер и взаимосвязь процессов снятия твердого сплава при электроалмазном шлифовании, / В.В. Гостев // В кн.: Размерная электрохимическая обработка материалов. Материалы II Всесоюзной научно-технической конференции, Тула, Изд-во газ. Коммунар, 1969.

94. Узунян М.Д. Расчет числа зерен, участвующих в резании, и расстояние между ними на поверхности алмазного круга. / М.Д. Узунян // Станки и режущие инструменты, Харьков, Изд-во Харьк. гос. ун-та, 1966, вып. 1.

95. Афанасьев Н.В. Роль некоторых факторов в механизме электрической эрозии. / Н.В. Афанасьев, С. Н. Капелян // Электронная обработка материалов, 1969, № 1.

96. Намитоков К.К. К вопросу о возникновении и развитии низковольтных разрядов. / Намитоков К.К. // В кн.: Электроискровая обработка металлов. М., Изд-во АН СССР, 1963.

97. Новое в электрофизической и электрохимической обработке материалов. / Л., Машиностроение, 1972.

98. Лазаренко Б.Р. Электродинамическая теория искровой электрической эрозии металлов. / Б.Р. Лазаренко, Н.И. Лазаренко // Проблемы электрической обработки материалов. М., Изд-во АН СССР, 1962.

99. Артамонов А.Я. О некоторых особенностях электрической обработки тугоплавких материалов. / А.Я. Артамонов Электронная обработка материалов, 1966, № 4.

100. Воробьев А.А. Основы изменения свойств при электроискровой обработке. / А.А. Воробьев // Электронная обработка материалов, 1966, № 6.

101. Котляр А.М. Термодинамический анализ процесса электрохимического абразивного шлифования. / А.М. Котляр // Электрофизические и электрохимические методы обработки, 1971, вып. 11.

102. Старков В.К. Методика прямого наблюдения дислокационной структуры пластически деформируемой зоны при резании металлов. / В.К. Старков // Резание и инструмент. Харьков, Изд-во Харьков, гос. ун-та, 1972, вып. 5.

103. Екобори Т. Физика и механика разрушения и прочности твердых тел. / Т. Екобори // М., Металлургия, 1971.

104. Разрушение, т. 1 / Под ред. Либовиц Г. М. // Мир, 1973.

105. Лихтман В.И. Физико-химическая механика металлов. / В.И. Лихтман, Е.Д. Шукин, П.А. Ребиндер М. Изд-во АН СССР, 1962.

106. Чувствительность механических свойств к действию среды / Избр. доклады на междунар. симпозиуме // М., Мир, 1969

107. Костецкий Б.И. Качество поверхности и трение в машинах. / Б.И. Костецкий, Л. Ф. Колесниченко // Киев, Техніка, 1969.

108. Зорев Н.Н. Вопросы механики процесса резания металлов. / Н.Н. Зорев // М., Машгиз, 1956.

109. Саленко О.Ф. Процес і обладнання струминно-лазерного різання : монографія / О.Ф. Саленко, М.В. Загірняк, О.В. Фомовська, В.Г. Доценко, В.Т. Щетинін. – Харків: Мадрид, 2013. – 312 с.

110. Саленко О.Ф. Ефективне гідрорізання: монографія / О.Ф. Саленко, В.Б. Струтинський, М.В. Загірняк. – Кременчук: КДПУ, 2005. – 488 с.

111. Саленко О.Ф. Техніка та технологія гідроструменевої обробки: монографія / О.Ф. Саленко, В.Б. Струтинський. – Київ: ІЗМН ВІПОЛ, 1998. – 252 с.

112. Орел В.Н. Повышение производительности гидрорезания листовых заготовок при использовании механотронных систем предварительного нагружения / В.Н. Орел, А.Ф. Саленко, В.Т. Щетинин // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2015. – Випуск 5(94). – С. 118-124.

113. Саленко О.Ф. До питання моделювання процесу гідроабразивного прошивання отворів у заготовках полімерних матеріалів / О.Ф. Саленко, О.М. Мана, Є.С. Коваль, Ю.О. Павлюченко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. праць. – Краматорськ, 2012. – Вип. №30. – С. 431 – 442.

**СОДЕРЖАНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ГЛАВА 1. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ СОЗДАНИЯ ИНТЕГРИРОВАННЫХ ПРОЦЕССОВ РЕЗАНИЯ .....	5
1.1. Общий тепловой анализ зоны резания .....	5
1.2. Методики экспериментального определения мощности теплого потока, фактически развиваемого на контактных поверхностях с учетом теплообмена .....	7
1.3. Энергетический анализ контактных процессов при резании металлов в изотермических условиях.....	11
1.4. Энергетический анализ влияния теплопроводности обрабатываемого материала на теплоразгрузку контактных поверхностей.....	16
1.5. Энергетическая оценка причин превалирования износа по одной из поверхностей инструмента .....	21
1.6. Теплофизическое обоснование эффективности резания с искусственным нагревом .....	24
1.7. Энергетические характеристики процесса резания полимерных композитов.....	33
Вопросы для самостоятельного контроля .....	46
Список литературы к главе 1 .....	47
ГЛАВА 2. ПРЕДПОСЫЛКИ СОЗДАНИЯ ИНТЕГРИРОВАННЫХ ПРОЦЕССОВ РЕЗАНИЯ.....	49
2.1. Целевые рабочие процессы изготовления изделий в машиностроении .....	49
2.1.1. Деление-дозирование материала.....	50
2.1.2. Соединение.....	50
2.1.3. Формообразование.....	51
2.1.4. Изменение физико-механических и химических свойств.....	51
2.1.5. Размерная обработка деталей .....	52
2.1.6. Финишная обработка поверхности деталей.....	54
2.1.7. Сборка .....	55
2.1.8. Испытание машин .....	56
2.2. Тенденции, принципы и критерии создания интегрированных процессов обработки материалов резанием .....	56
2.2.1. Тенденции развития методов обработки материалов резанием .....	56
2.2.2. Принципы и методы создания интегрированных процессов обработки материалов резанием .....	57
2.3. Классификация интегрированных процессов обработки материалов резанием .....	59

2.3.1. Принципы систематики	59
2.3.2. Комплекс энергетических признаков	60
2.3.2.1. Вид энергии, непосредственно подводимой к объекту.....	60
2.3.2.2. Энергия, определяющая съём материала и физический механизм формообразования .....	64
2.3.2.3. Энергия, определяющая образование формы.....	66
2.3.2.4. Подвод энергии и распределение ее в пространстве, занимаемом объектом.....	66
2.3.2.5. Энергоемкость процесса формообразования.....	67
2.3.2.6. Комплекс технологических признаков.....	68
2.3.3. Комплекс инструментальных признаков	69
2.3.3.1. Конструктивные элементы инструмента.....	69
2.3.3.2. Конструктивные признаки инструмента... ..	71
2.3.3.3. Соотношение процессов резания и пластического деформирования.....	71
2.3.3.4. Виды рабочих движений инструмента.....	72
2.3.3.5. Характер рабочих движений инструмента.....	73
2.3.3.6. Скорость рабочих движений инструмента.....	73
2.3.3.7. Жесткость рабочей части инструмента.....	74
2.3.4. Комплекс признаков формообразования.....	74
2.3.4.1. Классификация формообразующих поверхностей деталей.....	74
2.3.4.2. Элементы теории формообразования.....	78
2.3.4.3. Метод размерного формообразования.....	78
2.3.4.4. Главный физический процесс, определяющий размерное формообразование.....	81
2.3.4.5. Характер формообразования.....	81
2.3.4.6. Состояние части материала объекта, удаленного в процессе формообразования.....	82
Вопросы для самостоятельного контроля	83
Список литературы к главе 2	84
<b>ГЛАВА 3. ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ПРОЦЕССЫ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ</b>	<b>85</b>
3.1. Резание с опережающим пластическим деформированием	85
3.2. Совмещение в одном инструменте режущих и деформирующих элементов (РЭ, ДЭ)	92
3.2.1. Деформирующее протягивание	92
3.2.2. Режущее протягивание	93
3.2.3. Интегрированное протягивание	96
3.3. Резание с предварительной приработкой режущего инструмента	98

3.4. Процесс резания с интегрированной кинематикой (на примере тангенциального точения)	116
3.4.1. Понятие о процессе резания с интегрированной кинематикой.....	116
3.4.2. Общие сведения о процессе тангенциального точения.....	124
3.4.3 Физические явления, сопровождающие процесс интегрированного резания .....	135
3.4.4. Теоретические предпосылки сухого резания при тангенциальном точении инструментами из твердых сплавов.....	139
3.4.5. Практическая реализация тангенциального резания.....	149
3.5. Резание инструментом с покрытиями.....	164
3.5.1. Влияние покрытий на условия резания, износ и стойкость инструмента .....	164
3.5.2 Взаимосвязь контактных характеристик и параметров стружкообразования при резании .....	166
3.5.3. Влияние покрытия на основные характеристики процесса резания.....	169
3.5.4. Износ и стойкость инструмента с покрытием .....	180
3.5.5. Конструирование многослойных покрытий для режущих инструментов .....	188
3.5.6. Методы оценки основных эксплуатационных свойств покрытий для режущих инструментов .....	190
3.5.6.1. <i>Определение толщины покрытия</i> .....	190
3.5.6.2. <i>Определение микротвердости покрытий</i> .....	191
3.5.6.3. <i>Определение прочности сцепления покрытия с подложкой (инструментальным материалом)</i> .....	192
3.5.6.4. <i>Определение адгезионных свойств покрытий к обрабатываемому материалу</i> .....	192
3.5.6.5. <i>Оценка износостойкости покрытия в условиях резания</i> .....	195
3.5.7. Создание многослойного покрытия для инструмента из быстрорежущей стали при обработке железо-углеродистого материала Сталь 45.....	196
3.6 Упрочнение режущей части инструментом путем интегрированного электроэрозионного легирования	199
3.6.1 Современное состояние теории и практики технологии электроэрозионного легирования металлорежущего инструмента	199
3.6.2. Интегрированные технологии электроэрозионного легирования	206
3.6.2.1. <i>Интегрированные технологии нанесения двухслойных и квазимногослойных электроэрозионных покрытий</i>	207
3.6.2.2. <i>Интегрированные технологии нанесения композиционных электроэрозионных покрытий</i>	208

3.6.2.3. <i>Интегрированные технологии, сочетающие ЭЭЛ с другими способами улучшения режущих свойств инструментов</i>	210
3.6.2.4. <i>Интегрированные технологии улучшения режущих свойств инструментов методом ЭЭЛ пучком электродов.</i>	211
Вопросы для самостоятельного контроля .....	213
Список литературы к главе 3 .....	217
<b>ГЛАВА 4. ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ПРОЦЕССЫ ОБРАБОТКИ АБРАЗИВНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ</b> .....	<b>223</b>
4.1. Разработка методологии управления параметрами режущего рельефа алмазно-абразивного инструмента .....	223
4.2. Алмазное шлифование с вибрациями и управлением рабочей поверхностью кругов.....	227
4.2.1. Общие положения .....	227
4.2.2. Реализация процесса применительно к заточным станкам, работающим торцевыми кругами .....	228
4.2.3. Реализация процесса применительно к кругло,- плоскошлифовальным и заточным станкам, работающим периферийными кругами.....	230
4.2.4. Реализация процесса применительно к плоскошлифовальным станкам с вертикальным шпинделем, работающим торцевыми кругами .....	234
4.2.5. Реализация процесса применительно к профильному шлифованию периферийными кругами .....	235
4.3. Алмазное шлифование с вибрациями и управлением параметрами РПК .....	237
4.3.1. Основные предпосылки для усовершенствования управляемого процесса шлифования ПСТМ.....	237
4.3.2. Шлифование с введением в зону обработки инфразвуковых колебаний .....	240
4.3.3. Управляемый процесс шлифования с дополнительным наложением ультразвуковых колебаний .....	250
4.3.4. Моделирование процесса шлифования с наложением ультразвуковых колебаний.....	251
4.3.5. Влияние вибрационных колебаний на НДС зоны шлифования .....	254
4.3.6. Разработка адаптивной системы управления параметрами РПК .....	258
4.4. Виброабразивная обработка.....	261
4.4.1. Сущность, основные параметры и технологические возможности виброабразивной обработки .....	262
4.4.2. Технологическое оснащение, оборудование, приспособления, инструментальная среда, технологическая жидкость .....	266

4.4.3. Инструментальная среда (ОС) .....	280
4.4.4. Технологические жидкости (ТЖ) .....	283
4.4.5. Разработка технологической операции ВиАО .....	285
4.5. Магнитно-абразивная обработка .....	288
4.5.1. Основные составляющие метода MAO .....	290
4.5.2. Краткая характеристика методов и схем для реализации процесса магнитно-абразивной обработки .....	290
4.5.3. Порошковые материалы, применяемые при MAO .....	298
4.5.4. Конструктивные особенности формообразующих MAI элементов .....	305
4.5.5. Основные закономерности процесса MAO .....	306
4.5.6. Скорость резания при MAO .....	311
4.5.7. Силы резания при MAO .....	312
4.5.8. Магнитно-абразивная обработка деталей сложной пространственной конфигурации .....	314
4.5.9. MAO концевой режущего инструмента .....	315
4.5.10. Обеспечение качества рабочих лопаток ГТД магнитно- абразивным методом .....	318
4.5.11. Влияние магнитно-абразивной обработки на состояние поверхности и физико-механические характеристики поверхностного слоя лопаток ГТД .....	321
4.5.12. Влияние MAO на формирование технологических остаточных напряжений в поверхностном слое лопаток ГТД .....	322
4.5.13. Влияние наследственности обработки на состояние поверхности и физико-механические свойства поверхностного слоя лопаток .....	326
4.5.14. Реализация интегрированного процесса магнитно- абразивного полирования в потоке газовой среды внутренних поверхностей полимерных оптических изделий .....	328
4.5.15. Конструкция полировальной головки для реализации интегрированного процесса магнитно-абразивного полирования внутренних поверхностей в газовой среде .....	331
4.6. Алмазно-искровое шлифование .....	335
4.6.1. Сущность процесса .....	335
4.6.2. Особенности АИШ твёрдых сплавов .....	340
4.6.3. Работоспособность алмазных зёрен .....	342
4.6.4. Комплексные показатели процесса .....	345
4.6.5. Особенности износа алмазных кругов и зёрен .....	346
4.6.6. Остаточные напряжения .....	354
4.7. Силовое (глубинное) электроалмазное шлифование .....	359
4.7.1. Общие сведения о процессе АЭХШ. Краткая характеристика процесса .....	360

4.7.2. Физические особенности силового электроалмазного шлифования .....	366
4.7.2.1. Рабочий зазор .....	366
4.7.2.2. Гидродинамика электролита .....	368
4.7.2.3. Кинетика растворения твердых сплавов и сталей .....	371
4.7.2.4. Действительная плотность тока и рабочее напряжение .....	374
4.7.2.5. Роль электроэрозии .....	381
4.7.2.6. Разрушение обрабатываемого материала .....	385
4.7.2.7. Сопутствующие механизмы разрушения .....	387
4.7.3. Производительность процесса и износостойкость алмазных кругов .....	392
4.7.4. Качество поверхностного слоя .....	396
4.7.4.1. Макро- и микрорельеф обработанной поверхности .....	396
4.7.4.2. Шероховатость обработанной поверхности .....	399
4.7.4.3. Остаточные напряжения .....	400
4.7.4.4. Стойкость твердосплавного инструмента .....	401
4.7.5. Практическая реализация силового электроалмазного шлифования .....	403
4.8. Резание материалов в сопровождении сверхзвуковыми струями жидкости с примесями абразивов (гидроабразивное резание) .....	406
4.8.1. Гидроструйное и гидроабразивное резание .....	406
4.8.2. Водолеяное резание .....	422
4.8.3. Основные зависимости струйно-абразивного резания .....	426
4.8.4. Надежность процесса .....	428
4.8.5. Эффекты управляемого разрушения материалов на основе интеграции факторов влияния .....	432
Вопросы для самостоятельного контроля .....	434
Список литературы к главе 4 .....	438

Підручник підготовлено відповідно до програм та навчальних планів провідних технічних університетів і віддзеркалює сучасний рівень інформації щодо нетрадиційних способів виготовлення виробів. Використано переваги нового підходу, що дозволило із великої кількості діючих технологій вибрати саме ті, які базуються на принципі інтегрованих технологій, включаючи потенціали високоефективних технологій, переваги яких об'єднуються, забезпечуючи підвищення ефективності всього виробництва. Сучасному рівню підручника в великій мірі сприяло залучення оригінальних матеріалів, отриманих у вітчизняних та зарубіжних вузах та наукових центрах. Для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за спеціальностями «Прикладна механіка» та «Галузеве машинобудування», а також для студентів, магістрів та аспірантів машинобудівних спеціальностей, інженерів і технічних працівників машинобудівних галузей.

Навчальне видання

**Грабченко** Анатолій Іванович  
**Залога** Вільям Олександрович  
**Внуков** Юрій Миколайович та ін.

## **Інтегровані процеси обробки матеріалів різанням**

Підручник  
(російською мовою)  
Друкується в авторській редакції

Директор видавництва Р.В. Кочубей. Головний редактор В.І Кочубей  
Дизайн обкладинки і макет В.Б. Гайдабрус. Технічний редактор А.О. Литвиненко  
Підписано до друку 10.02.2016, Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Папір офсетний. Друк цифровий.  
Ум. друк. арк. 26,2. Обл.-вид. арк. 23,7. Тираж 300 прим. Замовлення № Д16-18/12

Відділ реалізації.  
Тел./факс: (0542) 65-75-85. Тел.: (067) 542-08-01.  
E-mail: info@book.sumy.ua

ТОВ «ВТД «Університетська книга».  
40009, м. Суми, вул. Д. Галицького, 27.  
E-mail: publish@book.sumy.ua. www.book.sumy.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
ДК № 489 від 18.06.2001

Надруковано на обладнанні ВТД «Університетська книга»  
вул. Д. Галицького, 27, м. Суми, 40009, Україна  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 489 від 18.06.2001



«Товарищество реализации инженерных задач» («ТРИЗ») учреждено в декабре 1990 г.

«ТРИЗ» является одной из ведущих производственно-инжиниринговых фирм со специализацией в области компрессорно- и насосостроения.

«ТРИЗ» поставляет продукцию и услуги для динамического оборудования химической, нефтехимической, газотранспортной, нефтедобывающей, энергетической и других отраслей промышленности.

«ТРИЗ» обладает богатейшим опытом и обширным перечнем работ, выполненных для клиентов из России, Украины, Белоруссии, Узбекистана, Польши, Литвы, Болгарии.

«ТРИЗ» решает проблемы связанные с динамическим оборудованием в сжатые сроки.

«ТРИЗ» планомерно расширяет производственные мощности для полного и своевременного удовлетворения современными эффективными решениями заказчика.

### **Продукция:**

- Роторы для центробежных агрегатов;
- Уплотнения плавающие;
- Подшипники скольжения опорные демпферные (с гидростатическим подвесом), упорные (с рычажной выравнивающей системой);
- Муфты упругие с пакетами металлических элементов;
- Уплотнения торцовые (импульсные с газовой смазкой), лабиринтные, как из традиционных материалов (алюминий, латунь, бронза), так и с применением полимеров;
- Насосы специального назначения;
- Вихревые машины специального назначения, турбогенераторы.

### **Основные услуги:**

- Модернизация компрессоров и насосов;
- 3-D реинжиниринг;
- Монтаж и ремонт динамического оборудования;
- Диагностика динамических машин;
- Повышение осевой и радиальной устойчивости;
- Балансировка;
- Ремонт роторов;
- Внедрение энергосберегающих технологии;
- Бездеформационное упрочнение и восстановление деталей;
- Проведение испытаний методами неразрушающего контроля;
- Спектральный анализ углеродистых и легированных сталей, алюминиевых сплавов, олова (бabbitов)

Миссия «ТРИЗ» состоит в обеспечении Вас высокоэффективными техническими решениями, созданными с применением передовых технологий и защищенными патентами, разработанными для достижения высокой надежности и эффективности эксплуатируемого Вами оборудования, гарантировать безопасную и непрерывную работу Вашего предприятия, а также внести значительный вклад в конкурентоспособность и финансовые успехи Вашей компании.

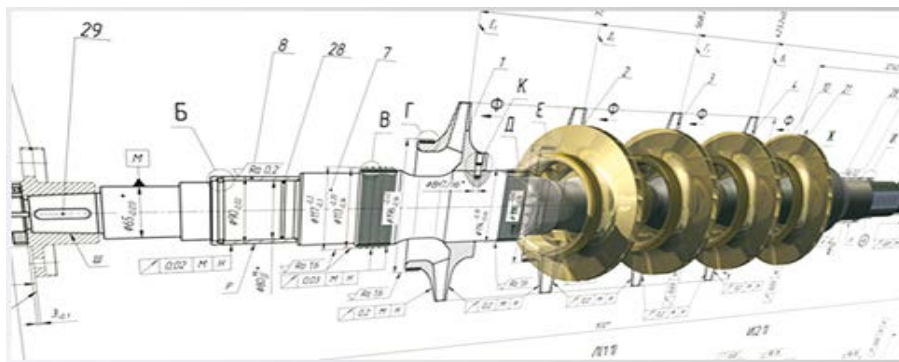


***Ваши проблемы это наши проблемы,  
Ваши успехи являются нашими успехами.***

«ТРИЗ» активно участвует в повышении эффективности работы динамического оборудования, увеличения межремонтного пробега тем самым уменьшая проблемы глобального потепления с помощью передовых технологий и продукции.

Для «ТРИЗ» — честь быть партнером Вашей компании. Мы всегда ожидаем возможности удовлетворить Ваши желания.

Девиз фирмы: **«ВМЕСТЕ К ЛУЧШЕМУ»**, поэтому «ТРИЗ» **всегда с ВАМИ.**





ТОВАРИСТВО РЕАЛІЗАЦІЇ ІНЖЕНЕРНИХ ЗАДАЧ

25 ЛЕТ ВМЕСТЕ К ЛУЧШЕМУ!

Приёмная:

[triz@triz.sumy.ua](mailto:triz@triz.sumy.ua)

Маркетинг:

[marketing@triz.sumy.ua](mailto:marketing@triz.sumy.ua)

[www.triz.sumy.ua](http://www.triz.sumy.ua)

Сумы, Украина, 40020

ул. Машиностроителей, 1

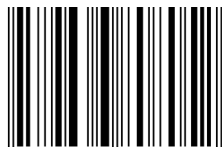
тел. +38 (0542) 700-073

факс +38 (0542) 786-801

Учебник издан при финансовой поддержке  
**ООО "ТРИЗ"**



ISBN 978-966-680-805-2



9 789666 808052