

ена



ОСНОВЫ АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ



ОСНОВЫ АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ

**Под общей редакцией
д-ра техн. наук М. Ф. Семко**

**Киев
«Техніка»
1978**

6П4.67

О-75

УДК 621.921.34

Основы алмазного шлифования. Семко М. Ф., Грабченко А. И., Раб А. Ф., Узунян М. Д., Пивоваров М. С. Киев, «Техніка», 1978. 192 с.

Изложены основные вопросы физики и механики резания единичными зернами алмаза и шлифования алмазными кругами: взаимодействие единичных зерен с обрабатываемыми сталями, твердыми сплавами, минералокерамикой, сверхтвердыми поликристаллами; режущая способность алмаза и контактные физикомеханические явления; силы резания и тепловые явления; формирование новой поверхности, ее шероховатость и состояние поверхностного слоя; природа износа алмаза и алмазных кругов, методы управления их режущей способностью; работоспособность алмазных кругов в различных условиях шлифования; принципы выбора характеристики и рациональных режимов эксплуатации алмазного инструмента. Намечены перспективы дальнейшего совершенствования процесса алмазного шлифования, обеспечивающего улучшение качества продукции, снижение себестоимости и повышение эффективности производства. Монография предназначена для научных работников, а также может быть полезна инженерно-техническим работникам машиностроительных заводов, проектных и научно-исследовательских учреждений.

Табл. 26. Ил. 91. Список лит.: 99 назв.

Рецензент канд. техн. наук В. Е. Любимов

Редакция литературы по машиностроению и транспорту
Зав. редакцией М. А. Василенко

О $\frac{31207-005}{M202(04)-78}$ 79-78

© Издательство «Техніка», 1978

В Основных направлениях развития народного хозяйства на 1976—1980 гг. предусматривается расширить производство металлообрабатывающего инструмента, особенно с применением природных и синтетических алмазов и других сверхтвердых материалов и сплавов.

Впервые в СССР синтетические сверхтвердые материалы были получены в институте физики высоких давлений АН СССР под руководством акад. Б. В. Верещагина. Пионером в разработке промышленной технологии производства синтетических алмазов и инструментов из них, а также широкого внедрения алмазно-абразивного инструмента в промышленность стал коллектив Института сверхтвердых материалов АН УССР. Сейчас трудно назвать отрасль обрабатывающей промышленности, где технический прогресс не связывался бы со все возрастающим применением алмаза. Для последних 10—15 лет характерен процесс наращивания производственных мощностей и создания новых предприятий, производящих синтетические алмазы и алмазные инструменты.

Уникальное сочетание таких свойств алмаза, как самые высокие твердость и жесткость, низкий коэффициент трения и значительная износостойкость, высокая теплопроводность и устойчивость к агрессивным средам, предопределило высокие режущие свойства алмаза.

Результаты исследований позволяют утверждать, что алмаз как абразивный материал в наибольшей мере отвечает условиям эффективного резания при шлифовании прежде всего высокотвердых труднообрабатываемых материалов. В последнее время доказано, что алмазному шлифованию поддаются даже синтетические сверхтвердые поликристаллы марок АСБ, АСПК, СВ, эльбор-Р, гексанит-Р, ПТНБ, ИСМИТ и др.

Алмазные зерна имеют геометрические параметры кромок, выгодно отличающиеся от других абразивных материалов, и благодаря высокому модулю упругости и твердости воздействуют на обрабатываемый материал через весьма незначительные площадки, тем самым подвергая деформациям прилегающие к поверхности раздела меньшие объемы, чем при других видах абразивной обработки. Из-за низкого коэффициента трения энергетические затраты на

работу трения резко снижаются. Все это обуславливает соответствующее снижение мощности источников тепла в зоне резания и в сочетании с высокой теплопроводностью уменьшает роль температурного фактора в изменении свойств поверхностных слоев обрабатываемого материала. Последнее, как известно, является неизбежным в процессе шлифования кругами из традиционных абразивов — электрокорунда, карбида кремния.

Вместе с тем в зоне резания алмазными зернами возможны высокотемпературные вспышки, что способствует протеканию физико-химических явлений на поверхностях контакта. Эти и другие принципиальные особенности алмазного шлифования выявлены при резании единичными алмазными зернами.

Анализ структуры алмазоносного слоя кругов и их режущей поверхности, а также всестороннее изучение работы алмазных кругов выявили принципиально важную, самостоятельную роль связки, поскольку ее значительные участки обычно контактируют непосредственно с обрабатываемым материалом. На основании этого, с одной стороны, можно формулировать ряд требований к связкам, с другой, — изыскивать способы воздействия на связку, устраняющие ее контакт с деталью. К таким способам следует отнести прежде всего комбинированные методы обработки (электроалмазное, электроэрозионное шлифование и др.), способствующие более полной реализации режущих свойств алмаза.

Материалы данной монографии базируются на результатах исследований физической сущности процесса алмазного шлифования, которые проводились в последние 15 лет в отраслевой лаборатории алмазного инструмента при кафедре «Резание материалов и режущие инструменты» Харьковского политехнического института им. В. И. Ленина, а также на обобщении сведений, имеющих в отечественной и зарубежной литературе и полученных из практики.

Авторы надеются, что материалы, приведенные в книге, могут быть полезны при проектировании новых технологических процессов и внедрении в промышленность прогрессивных методов алмазной обработки.

Титульное редактирование выполнено д-ром техн. наук М. Ф. Семко на общественных началах.

Отзывы и пожелания просим направлять по адресу: 252601, Киев, 1, ГСП, Пушкинская, 28, издательство «Техніка».

СВОЙСТВА АЛМАЗА И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ПРОЦЕСС ШЛИФОВАНИЯ

АЛМАЗ И ЕГО ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА

Алмаз занимает особое место среди природных и синтетических материалов, что объясняется его уникальными свойствами. Приоритет в разработке теории синтеза алмаза принадлежит советскому ученому, доктору физико-математических наук проф. Лейпунскому О. И., который в 1939 г. сформулировал необходимость сочетания трех условий синтеза алмаза — высокой температуры, высокого давления и соответствующей среды. При этом давление и температура при переходе графита в алмаз должны отвечать условиям термодинамической стабильности алмаза и кинетическим условиям перестройки кристаллической решетки [30].

В настоящее время известно несколько методов синтеза алмаза, отличающихся уровнем давлений, температуры и длительностью процесса. В области термодинамической стабильности алмаза исходный углеродсодержащий материал подвергается воздействию высокого статического давления и температуры в течение нескольких секунд; при динамическом воздействии высоким давлением это время сокращается до микросекунд и менее; в области термодинамической стабильности графита при низком давлении (не выше атмосферного) и высокой температуре ($900\text{—}1050^\circ\text{C}$) происходит эпитаксиальное наращивание алмаза из газа (например, метана, смеси метан-диборан на затравках) [69].

В результате исследований установлено, что строение элементарной ячейки синтетических алмазов не отличается от строения природных. Наименьшее расстояние между атомами углерода составляет 0,154 нм, размер ребра ячейки — 0,356 нм. Это определяет высокую плотность структуры алмаза и его характерные свойства: высокую твердость, яркий блеск, высокий модуль упругости и др. В кристаллах их вершины соответствуют узлам, ребра — рядам узлов, грани — плоским сеткам. Каждая кристаллическая решетка имеет множество плоскостей с различной ориентацией, а главное, с различной плотностью. Твердость граней алмаза строго соответствует плотности плоских сеток. Более плотные сетки оказывают большее сопротивление

внедрению индентора, чем сетки с меньшей плотностью. Например, при нагрузке на индентор $P = 2$ Н микротвердость на кубической грани природного алмаза составила 54 ГПа, на ромбододекаэдрической — 77 ГПа и на октаэдрической — 95 ГПа [61]. Для синтетических алмазов микротвердость на гранях куба равна 53—67 ГПа и на гранях октаэдра 91—96 ГПа. При исследованиях было доказано, что значения микротвердости различны для алмазов напряженных и свободных от напряжений. Для первых они на 18—20% выше. Этому соответствовала большая плотность дислокаций.

Модуль упругости алмаза самый высокий из существующих природных и синтетических материалов. В процессе синтеза алмазов, например марки САМ, кристаллы свободно развиваются благодаря наличию небольшого числа центров кристаллизации, имеют четко сформированные ребра, грани, вершины и совершенное внутреннее строение. Кристаллографическое строение монокристаллов отражает традиционный для природных алмазов ряд геометрических форм от куба до октаэдра. Имеются также сростки, состоящие из двух — четырех монокристаллов, и агрегаты, в которых число таких монокристаллов превышает четыре [31]. К особенностям октаэдрических синтетических алмазов относят зеркальные и интерферометрически плоские грани, наличие на части граней спиралей роста, дендрито-подобных образований, а также треугольных или прямоугольных ямок травления [69].

В зависимости от формы, характера поверхности, прочности и хрупкости различают следующие марки алмазов: АСО, АСР, АСВ, АСК, АСС, САМ, АСБ и АСПК. Алмазы марки АСО характеризуются неправильной формой зерна, сильно развитой шероховатой поверхностью, имеют самую низкую прочность и высокую хрупкость. Алмазы марки АСР в 1,6—2 раза прочнее алмазов марки АСО, более совершенны по форме кристаллов и развитости поверхности. Еще большей прочностью и меньшей хрупкостью обладают алмазы марки АСВ, а алмазы марки АСК и САМ идентичны природным. Алмазные зерна марки АСБ и АСПК получают при дроблении синтетических поликристаллических алмазов типа баллас и карбонадо. Количественная характеристика параметров алмазных зерен различных марок представлена в табл. 1.

Особенностями структуры синтетических алмазов являются пустоты, микропоры, примеси и включения, коли-

Некоторые параметры алмазных зерен различных марок [67]

Показатель	Марка алмазного зерна				
	АСО	АСР	АСВ	А	АСС
Длина зерен l_3 , мкм	152	153	156	152	152
Ширина зерен b_3 , мкм	114	113	119	123	129
Высота зерен h_3 , мкм	84	78	89	62	103
Средний размер d_3 , мкм	133	133	138	138	140
Отношение размеров зерен:					
l_3/b_3	1,33	1,35	131	1,24	1,18
h_3/b_3	0,74	0,69	0,75	0,50	0,80
Число зерен в карате:					
тыс. шт.	125	121	90	95	72
%	100	97	72	76	56
Коэффициент заполнения объема зерна K_3	0,193	0,199	0,239	0,266	0,287
Прочность единичного зерна P :					
Н	2,411	4,27	6,17	9,51	17,74
%	100	178	257	296	738
Площадь поперечного сечения зерна S_3 , мм ²	0,0590	0,0602	0,0744	0,0708	0,0851
Предел прочности на сжатие $\sigma_{сж}$, %	100	171	202	326	507
Коэффициент формы зерна K_ϕ	8,78	6,54	5,54	4,55	4,46

чество которых в этих алмазах во много раз больше, чем в природных. Это приводит к изменению удельного веса, прочности, ферромагнетизма, термостойкости и других свойств синтетических алмазов в сравнении с природными.

Основные физико-механические свойства абразивов приведены в табл. 2 [71]. Высокая теплопроводность алмаза (138,6—147 Вт) (м · К) сочетается с его большой удельной теплоемкостью (0,504 Дж · К) и обеспечивает высокую теплопроводность ($0,8 \cdot 10^{-4}$ м² · с). Последняя является весьма важной характеристикой алмаза, так как он весьма чуток к повышенным температурам. Однако поведение алмаза при высоких температурах еще недостаточно изучено. Температура плавления алмаза достигает 3700—4000° С. В воздушной среде алмаз начинает гореть слабым голубым пламенем при 850—1000° С, а в струе чистого кислорода — при 720—800° С. Было также зафиксировано начало окисления при температуре 700° С. Экспериментально установлено, что алмаз в микропорошке с размером зерен 5 мкм

Таблица 2

Основные физико-механические свойства абразивов [71]

Свойство	Алмаз С	Карбид бора В ₄ С	Карбид кремния SiC	Электрокорунд Al ₂ O ₃
Плотность * Г, кг/м ³	3,48—3,56 · 10 ³	2,48—2,52 · 10 ³	3,12—3,20 · 10 ³	2,00—2,10 · 10 ³
Микротвердость Н, ГПа	100	37—43	30—33	20—24
Модуль упругости Е, ГПа	900	296	365	—
Предел прочности на сжатие σ _с , ГПа	2,0	1,8	1,5	0,76
Коэффициент теплопроводности при 0°С λ, Дж/(м · с · К)	147	10,5	15,54	19,74
Удельная теплоемкость С, Дж/(кг · К)	504	—	588	756
Коэффициент линейного расширения α, 1 град · 10 ⁻⁶	0,9—1,45	4,5	6,5	7,5
Предел прочности при изгибе σ _и , МПа	210—490	210—280	50—150	80—90

* Зависит от марки и величины кристалла.

и ниже частично сгорал уже при температуре 500° С. Алмазы АСО имеют более низкую термостойкость, чем алмазы марки АСК [55]. При нагреве без доступа воздуха в среде аргона, азота и водорода горение отсутствует, но происходит графитизация алмаза. Она заметна уже при 1600—1800° С особенно в вакууме и в аргоне, а окончательно завершается при 2000—3000° С. Сначала графитизируются вершины и ребра зерен (кромки), а затем черная графитовая корка появляется и на остальной поверхности.

В общем фазовое превращение алмаза в графит характеризуется следующим. Среда и состояние образца определяют температуру начала термических превращений. Менее совершенные алмазы, в частности, имеющие металлические и другие включения, ориентированные или группирующиеся по границам блоков, графитизируются при более низких температурах как с поверхности, так и на дефектах в глубинных участках объемов. В областях, примыкающих к появившемуся графиту, возникают значительные напряжения. Скорость графитизации зависит от среды, кристаллографического направления, количества дефектов и примесей. Считают, что фазовое превращение алмаза при нагреве в неокислительной среде происходит по следующей схеме: образование аморфного углерода, превращение

аморфного углерода в турбостратный, частичная графитизация турбостратного углерода [49]. При этом все три стадии могут протекать как последовательно, так и практически одновременно.

При отсутствии фазовых изменений в результате нагрева размер алмазных кристаллов изменяется незначительно, так как их коэффициент теплового расширения невелик ($0,9 \cdot 10^{-6}$ — $1,45 \cdot 10^{-6}$).

Высокая химическая инертность алмаза обусловлена чрезвычайно прочными связями (за счет общих электронов) между атомами углерода в структуре. Эти связи резко снижают высокую химическую активность углерода. Она проявляется лишь тогда, когда создаются условия, в которых начинает происходить диссоциация кристаллической решетки алмаза. С точки зрения законов квантовой механики высокую химическую инертность алмаза склонны объяснять постоянной осцилляцией, которая состоит в превращении отрицательных в данный момент ионов в положительные, и наоборот. При высоких температурах ни одна из кислот и щелочей не реагирует с алмазом. Однако смесь серной кислоты с двуххромовокислым калием, а также расплавленная натриевая и калиевая селитра и сода окисляют его непосредственно в угольную кислоту. В таких условиях некоторые металлы могут частично или полностью растворять алмаз. В железе и его сплавах растворение алмаза наблюдалось при температуре 800°C и выше. На полированной поверхности алмаза при 100°C никель, железо и ферровольфрамовые сплавы вызывали появление шероховатостей [32, 33, 90].

Износостойкость кристаллов алмаза, как и его твердость, неодинакова в различных кристаллографических направлениях, но, как правило, очень высокая. Соответственно коэффициент трения по многим материалам весьма низок и не постоянный для различных кристаллографических направлений: наибольший для направлений, имеющих наименьшую износостойкость. В паре с армо-железом при низких скоростях ($0,3$ мк/с— $0,3$ мм/с) и нагрузке $0,05$ — $0,7$ Н коэффициент трения алмаза равен $0,05$ [24]. В табл. 3 приведены коэффициенты трения трех марок алмазов по различным материалам [18].

Алмазы марок АСБ и АСПК представляют собой поликристаллы, поэтому можно предположить, что коэффициенты трения других марок алмаза (АСВ, АСК, АСС) по

Коэффициент трения алмаза по различным материалам

Материал	Алмаз		
	природный	синтетический марки АСПК	синтетический марки АСБ
Медь М1	0,05—0,07	0,10—0,14	0,15—0,22
Латунь Л62	0,05—0,07	0,10—0,13	0,16—0,24
Латунь ЛС59-1	0,05—0,06	0,10—0,12	0,15—0,20
Магнийевый сплав МА8	0,06—0,08	0,12—0,14	0,17—0,26
Сталь 20	0,08—0,10	0,14—0,18	0,20—0,30
Дюралюминий Д16П	0,06—0,07	0,10—0,12	0,18—0,25

различным материалам занимают промежуточное положение между природными и поликристаллическими алмазами.

Наличие и сохранение на алмазах прочных адсорбированных пленок, разделяющих поверхности контакта алмаз — обрабатываемый материал, препятствуют схватыванию. Если при трении чистого алмаза по алмазу на воздухе коэффициент трения равен 0,1, то после подогрева алмаза в глубоком вакууме до высокой температуры коэффициент трения увеличивается до 0,5. Это объясняется тем, что вследствие подогрева алмаза в вакууме на его поверхности исчезают адсорбированные пленки. Аналогичная картина наблюдается и при трении алмаза по металлу, когда коэффициент трения изменялся от 0,2 до 3 [3, 99].

Удаление адсорбированных на поверхности кристалла алмаза пленок вызывает адгезию между алмазом и металлами, которая практически отсутствует при контакте в воздушной среде. Адгезионные свойства алмаза зависят от степени смачиваемости расплавленными металлами, которая оценивается краевым углом смачивания и поверхностным натяжением металлического расплава (метод покоящейся капли) [69]. Интенсивное смачивание алмаза жидкими металлами происходит в том случае, когда металлы интенсивно взаимодействуют с углеродом, образуя стабильные карбиды или растворяя значительное количество углерода. К таким металлам относятся Ti, Cr, V, Nb, Ta, Mo, W, Fe, Co, Ni, Pd, Pt, Si, В. Для них работа адгезии составляет 2,000—3,000 Дж/м² и угол смачивания 0—50°.

Титан, хром, тантал, ванадий отличаются наиболее высокой адгезионной активностью к алмазу. С ростом тем-

пературы резко увеличивается адгезия и смачиваемость [41]. При исследовании адгезионного взаимодействия металлов с алмазами в условиях вакуума и повышенных температур в качестве критерия был принят коэффициент адгезии — отношение усилия, необходимого для разделения образцов, к величине приложенной нагрузки [60]. Металлы, растворяющие углерод или активно химически взаимодействующие с ним, характеризуются сравнительно низкими температурами начала адгезии: (0,4—0,5) $T_{пл}$. Это — молибден, цирконий, тантал, железо. Более высокие значения температуры начала адгезионного взаимодействия зарегистрированы для кобальта, никеля, палладия, платины.

ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ АЛМАЗА НА ПРОЦЕСС ШЛИФОВАНИЯ

Алмазное шлифование — это процесс высокоскоростного контактного взаимодействия алмазных зерен и связки круга с обрабатываемым материалом, срезаемой стружкой и технологической средой, в результате которого изменения претерпевают все входящие в рассматриваемую систему элементы. Определяющим же фактором является воздействие твердого и острого алмазного зерна на обрабатываемый материал.

Эффективная обработка снятием стружки возможна лишь в том случае, если свойства инструментальных материалов, наряду с геометрическими параметрами режущих элементов и режимами резания, отвечают определенным требованиям с точки зрения основных закономерностей шлифования.

Как известно, отношение твердости абразивного материала H_a к твердости обрабатываемого материала H_m имеет важнейшее значение для выбора условий шлифования и должно составлять не менее 1,5. Если, исходя из этого, сопоставить твердость различных абразивных материалов и наиболее твердых компонентов сталей, твердых сплавов и минералокерамики (табл. 4), то легко убедиться в том, что при обработке незакаленных сталей, цветных сплавов, чугунов и определенных марок пластмасс применение кругов из электрокорунда или из карбида кремния вполне оправдано, так как твердость материала обычно не превышает 10 ГН/м^2 и указанное отношение равно 2. Однако

Таблица 4

Отношение твердости абразивов к твердости некоторых материалов

Материал	Микротвердость, ГПа	Отношение H_a/H_m для				Шлифующая способность
		электрокорунда	карбида кремния	карбида бора	алмаза	
Высокоуглеродистый мартенсит	10	2,2	3,3	4,3	10	—
Карбид ванадия	11	2,0	3,18	3,99	9,1	—
Карбид хрома	17	1,3	2,06	2,764	5,85	—
Электрокорунд	22	1	1,59	2,136	4,55	0,14—0,16
Карбид вольфрама	24	0,92	1,45	1,958	4,15	—
Оксид алюминия (ЦМ-332)	29	0,757	1,2	1,62	3,45	—
Карбид титана	32	0,69	1,03	1,34	4,12	—
Карбид кремния	35	0,63	1	1,23	2,86	0,25—0,45
Карбид хрома	43	0,51	0,82	1	2,3	0,6
Алмаз	100	0,22	0,35	0,43	1	1

уже для закаленных и высоколегированных сталей, твердых сплавов, минералокерамики ЦМ-332, ситаллов и других высокотвердых материалов твердость этих абразивов оказывается недостаточной и только для алмаза в случае обработки всех высокотвердых материалов обеспечивается отношение H_a/H_m значительно выше предельных. Другими словами, только для алмаза создаются необходимые условия для эффективного резания при обработке высокотвердых материалов.

Под воздействием большого количества тепла, выделяющегося в зоне работы отдельных абразивных зерен, происходит значительный нагрев обрабатываемого материала и режущего абразивного зерна в местах их контакта. Следовательно, в реальном процессе резания взаимодействуют материалы, фактически обладающие твердостью, отличной от исходной. Поэтому принято рассматривать «горячую» твердость или твердость в горячем состоянии.

Твердость инструментальных материалов, а также их отдельных компонентов снижается с повышением температуры. Однако интенсивность снижения твердости абразивных и инструментальных материалов в тех или иных диапазонах не одинакова. Необходимое превышение твердости

Основные теплофизические свойства абразивов

Абразивный материал	Температура, °С	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)	Температуропроводность, м²/с·10 ⁻⁶
Электрокорунд	1000—1400	5,25	1092,0	4,3
Карбид кремния	1000—1400	9,92	1134,0	10,4
Алмаз	20	138,6	474,6	300,0

обычных абразивов над твердостью инструментальных материалов достигается при температурах 700—900°С, которые неизбежно порождают дефекты в поверхностном слое [63].

При резании алмазным зерном в таком нагреве материала необходимости нет. Обладая чрезвычайно высокой твердостью, алмаз в состоянии эффективно срезать стружки с материалов без снижения исходной твердости за счет увеличения температуры. Однако в реальных процессах выделение тепла неизбежно, при этом определенное количество тепла уходит в абразивное зерно, в результате чего за время контакта оно нагревается. Абразивный материал, у которого теплопроводность выше, отводит большее количество тепла из зоны резания, прогреваясь на большую глубину (табл. 5). Уровень температуры определяет размягчение (снижение твердости) абразивного материала.

Температуропроводность алмаза во много раз выше, чем у карбида кремния и электрокорунда (табл. 5). Следовательно, если бы в зоне работы алмазного зерна выделялось столько же тепла, сколько в зоне работы зерен из электрокорунда или карбида кремния, то и тогда бы алмазное зерно вследствие высокой температуропроводности нагревалось до более низкой температуры, чем другие абразивы. Способность алмаза быстро отводить температуру от режущих элементов сохраняет их высокую режущую способность. Следует отметить, что температуропроводность алмаза в 3,3 раза выше, чем у твердого сплава ВК8, в 7,5 раз больше, чем у сплава Т15К6, в 16 раз больше, чем у стали Р9.

Общее количество тепла, выделяющегося в зоне резания, во многом зависит от механизма работы алмазного зерна. Чрезвычайно высокая твердость алмаза создает условия, благоприятные для эффективности резания даже при

Таблица 6

**Зависимость толщины стружек от геометрических параметров
абразивных зерен, мкм**

Размер зерна	Радиус округления вершин		Минимальная толщина снимаемой стружки	
	АСО	ЭВ	АСО	ЭВ
80	1,1	—	0,11—0,55	—
100	2,2	—	0,22—1,1	—
120	3,2	—	0,32—1,60	—
160	—	13	—	1,3—6,5
250	7,8	18	0,78—3,9	1,8—9,0

обработке высокотвердых, в частности инструментальных, материалов. Но наряду с этим необходимо, чтобы геометрические параметры алмазных зерен также соответствовали требованиям эффективного резания. Отделение стружки происходит в том случае, когда режущий элемент (алмазное зерно) углубится в обрабатываемый материал на $(0,1...0,5)\rho$, т. е. $a_z/\rho = 0,1...0,5$, где ρ — радиус округления вершины зерна, a_z — толщина единичного среза [42, 62]. Это соотношение определяет действительные передние углы режущих вершин. Результаты измерения, полученные при многочисленных исследованиях, подтвердили, что радиусы округления вершин алмазных зерен значительно меньше, чем абразивных. Поэтому с помощью алмазных зерен можно снимать стружки значительно меньшей толщины (табл. 6). Алмаз имеет самый высокий модуль упругости, и поэтому в большей мере сохраняет исходные параметры вершин при воздействии контактных давлений, что не характерно для других абразивов.

При взаимодействии алмазного зерна и шероховатой поверхности первичный контакт происходит по неровностям субмикрорельефа (рис. 1). Профиль субмикрорельефа можно аппроксимировать прямолинейными отрезками, радиусы сопряжения которых малы. Поэтому в качестве параметров, характеризующих субмикрорельеф алмазных зерен, были приняты длина прямолинейных участков профиля a и углы между ними, образующие выступы $+\alpha$ и впадины $-\alpha$. Распределение длин субмикрокромки подчиняется экспоненциальному (рис. 2, а), а распределение углов субмикропрофиля — нормальному (рис. 2, б, в) законам.

Установлены количественные различия $\bar{a}$ и $\bar{\alpha}$ для зерен различных размеров и прочности, что связано с размерами блоков и агрегатным строением синтетических алмазов.

Благодаря микрогеометрии и субмикрогеометрии в сочетании с высоким модулем упругости алмазное зерно воздействует на обрабатываемый материал через меньшие контактные поверхности, чем зерна других абразивных материалов. Это приводит к высокой концентрации эффективных напряжений, влияющих на работу деформации, ее характер и, в итоге, разрушение обрабатываемого материала. Самым экономичным с точки зрения энергетических затрат был бы такой процесс обработки, при котором эффективные напряжения возникали бы только в поверхности раздела материала припуска и основной детали.

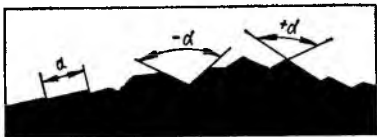


Рис. 1. Профиль субмикрорельефа алмазного зерна, $\times 5000$.

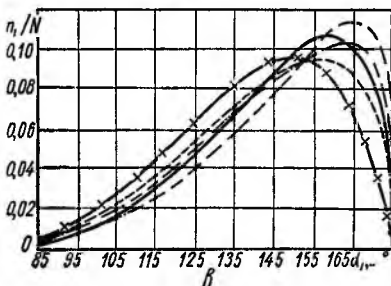
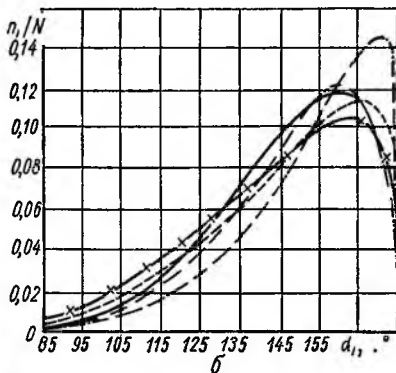
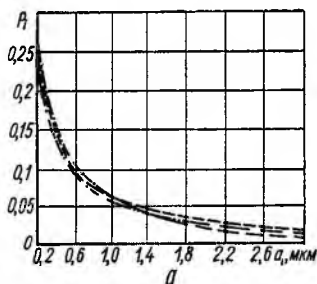


Рис. 2. Статистическое распределение геометрических параметров алмазных зерен:

a — распределение плотности вероятности p_i длин субмикроморфок a_i для зерен различной прочности, b — распределение частоты n_i/N углов выступов субмикрорельефа зерен α , $в$ — распределение частоты n_i/N углов впадин субмикрорельефа зерен, — — — АСО 50/40, — — — АСО 100/80, — — — АСВ 100/80, — — — АСВ 250/200

В действительности же деформация и разрушение охватывают объемы материала, прилегающие к поверхностям раздела, особенно те, которые составляют стружку. Известно, что в абразивных процессах 80—98% подводимой энергии затрачивается на работу трения. Острота кромок алмаза и способность срезать тончайшие стружки резко снижают работу пластического выдавливания и вероятность проскальзывания алмаза, а низкий коэффициент трения в условиях сохранения адсорбционных пленок на алмазе значительно уменьшает силы и работу трения, создает физические предпосылки для снижения энергоемкости процесса алмазного шлифования. В условиях, когда окисные пленки отсутствуют, могут интенсивно проявиться химическая активность и адгезионные свойства алмаза. Поэтому наряду с особенностями механического взаимодействия алмаза с обрабатываемым материалом при определенных условиях происходит достаточно активное их физико-химическое взаимодействие.

РОЛЬ СТРУКТУРЫ АЛМАЗОНОСНОГО СЛОЯ В ПРОЦЕССЕ ШЛИФОВАНИЯ

Алмазно-абразивный инструмент состоит из корпуса и алмазonoсного слоя, структура которого в общем случае определяется соотношением количества алмазных зерен связки и пор. Применяемые связки (органические, металлические, керамические и специальные) должны обеспечивать необходимую прочность удержания алмазных зерен, сопротивляемость изнашиванию, высокую теплопроводность и др. Некоторые из связок, например бакелитовые, имеют в своем составе абразивные или металлические наполнители.

Принципиальной особенностью структуры алмазonoсного слоя в отличие от абразивного является значительно меньшее содержание в единице объема алмазных зерен, чем зерен карбида кремния или электрокорунда. Объемная концентрация алмазов в кругах составляет лишь 6,25—50%.

Количество алмазных зерен и расстояние между ними на рабочей поверхности круга зависит от концентрации, зернистости, марки алмазов и характера распределения зерен по объему алмазonoсного слоя. Все это определяет развитость режущей поверхности алмазного круга, величину выступания алмазных зерен из связки, условия вмещаемости стружки. Как показали измерения, число микро-

кромок алмазных кругов на органической связке в процессе шлифования практически не меняется, однако глубина их залегания l (расстояние от максимально выступающей вершины режущего профиля) заметно уменьшается, при этом изменяется и их распределение по глубине (рис. 3).

Поскольку большая часть микрокромов имеет значительную глубину залегания, то они могут снимать лишь

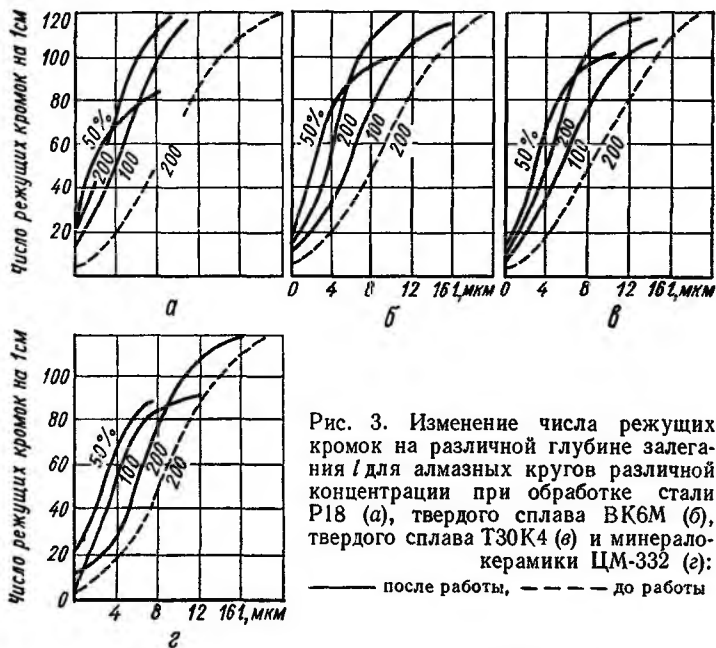


Рис. 3. Изменение числа режущих кромок на различной глубине залегания l для алмазных кругов различной концентрации при обработке стали P18 (а), твердого сплава ВК6М (б), твердого сплава ТЗ0К4 (в) и минерало-керамики ЦМ-332 (г): — после работы, - - - до работы

стружки малой толщины a_z , что возможно при малых радиусах округления этих кромок. Небольшая часть кромок, далеко выступающих над поверхностью связки, может снимать более толстые стружки. В абразивном круге большая часть зерен, имеющих значительную глубину залегания, из-за больших значений ρ не может эффективно срезать материал, а лишь скользит по поверхности или пластически деформирует ее. Зерна алмазного круга благодаря большой остроте будут работать с меньшими усилиями, срезая стружки с обрабатываемого материала; при этом пластические деформации и тепловыделения должны быть значительно меньшими.

Анализ режущей поверхности алмазных кругов позволил сделать еще один принципиально важный вывод о

специфике алмазного шлифования: в процессе работы значительные участки связки алмазного круга контактируют с обрабатываемой поверхностью.

Если природа материала связки или ее наполнителя окажется родственной обрабатываемому материалу (металлический порошок — сталь), то такое сродство может явиться причиной определенного физико-химического взаимодействия между ними.

В зоне контакта связки могут развиваться значительные силы трения. Трение связки является источником дополнительного теплообразования, не связанного непосредственно с работой резания.

С точки зрения теплоотвода поверхность контакта круга с обрабатываемой поверхностью будет крайне неоднородна, так как алмаз отводит тепло сильнее, чем связка. В результате этого могут возникать неодинаковые температурные условия на различных участках обрабатываемой поверхности.

В ряде случаев для повышения эффективности алмазного шлифования необходимо принудительное устранение контакта связки круга с обрабатываемым материалом.

МЕТОДЫ УЛУЧШЕНИЯ РЕЖУЩИХ СВОЙСТВ АЛМАЗА

Специализация в области производства синтетических алмазов базируется на целом ряде методов управления свойствами алмазных порошков. Рассмотрим некоторые из них.

Управление свойствами алмаза в процессе синтеза. Известно, что величина, цвет, совершенство поверхности, внутреннее строение, прочность алмазов зависят от температуры и давления при синтезе [31]. При высоких давлениях по мере увеличения температуры кристаллизации наблюдается переход от низкотемпературных черных кристаллов кубической формы к прозрачным октаэдрическим. Путем подбора термодинамических параметров удалось получить синтетические алмазы различных кристаллографических форм: кристаллы кубического и октаэдрического габитусов, кубооктаэдры, ряд типов овальной формы. Автоматическое регулирование параметрами синтеза осуществляется при помощи специального устройства «импульс». Разделение алмазов по формам производится на вибростолах.

Следует отметить, что все три параметра синтеза (давление, температура и время) взаимосвязаны и значение каждого из них обусловлено экономическими соображениями. Весь процесс синтеза представляет собой вариационную задачу, которую в производственных условиях решают с позиции минимизации себестоимости. Существующие технологические процессы разработаны таким образом, чтобы за малое время синтеза получить максимальный выход крупных зернистостей с преобладанием кристаллов правильной формы. С увеличением продолжительности синтеза в условиях камеры одного и того же объема приходится понижать давление и температуру для получения более крупных и совершенных кристаллов.

Количество алмаза G_y , получаемого за один цикл, находится в зависимости от его длительности τ :

$$G_y = i\tau^b,$$

где i и b — коэффициенты, определяемые экспериментально. Получение алмазных частиц больших размеров (предельная фракция) связано с определенными трудностями. Зависимость количества предельной фракции в комплексном порошке от длительности цикла

$$\gamma_y = \lg \tau.$$

Корректировка формы алмазных зерен. В производственном процессе получения синтетических алмазов большое внимание уделяется избирательному дроблению, корректировке формы и овализации алмазных частиц. В первоначальной стадии в дробилке, мельнице, овализаторе происходит избирательное дробление хрупких, непрочных частиц, зерен с наружными и внутренними дефектами. Осколки разрушившихся непрочных зерен переходят в более низкие классы по размерности. При дальнейшей обработке алмазов производится корректировка формы зерен: разрушаются прочно сидящие на зернах наросты в виде дендритных образований, рыхловатые участки поверхности, срощенные кристаллиты, в результате чего поверхность зерен улучшается. Механическая прочность порошков, частицы которых корректировали по форме, значительно выше тех алмазов, которые прошли только стадию избирательного дробления.

Обработка алмазов в овализаторах или в других дробильно-мольных устройствах, работающих в режимах овализации, способствует получению порошков с зернами овальной формы.

Принцип работы нового типа овализатора синтетических алмазов основан на воздействии вращающегося электромагнитного поля на ферромагнитные элементы (рис. 4). Овализатор состоит из реакционной камеры 9, выполненной в виде цилиндрической трубы из немагнитного материала, генератора 1, возбуждающего электромагнитное

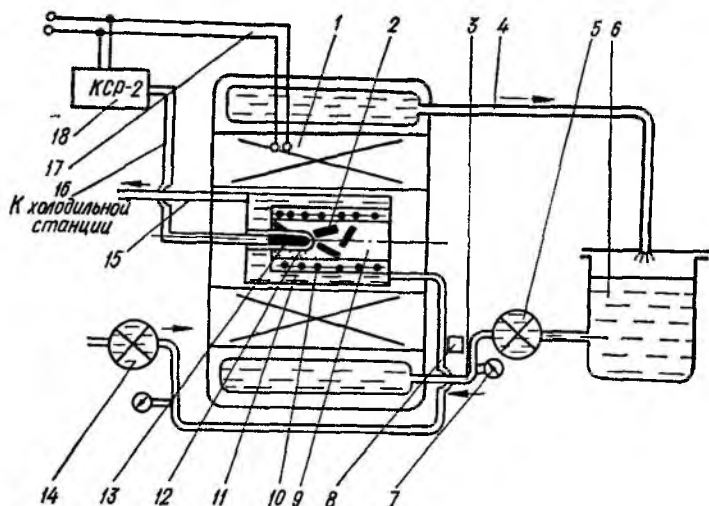


Рис. 4. Принципиальная схема электромагнитного овализатора:

1 — генератор, 2 — ферромагнитные частицы; 3 — масляная магистраль; 4 — магистраль слива; 5 — масляный насос; 6 — сливной бак; 7 — масляный манометр; 8 — предохранительный клапан; 9 — реакционная камера; 10 — система нагрева; 11 — система охлаждения реактора; 12 — обрабатываемый алмаз; 13 — термопара; 14 — водяной насос; 15 — магистраль слива воды; 16 — линия замера температуры; 17 — линия питания статора; 18 — потенциометр.

поле, размещенного в корпусе. Рабочая камера аппарата помещается в электромагнитное поле статора, вращающегося со скоростью 300 об/мин.

При увеличении напряжения, подаваемого на обмотку возбуждения статора, с возникновением в камере магнитной индукции начинается сложное движение отдельных магнитных частиц 2. Частицы, намагничиваясь, вращаются в направлении вектора электромагнитного поля, вызывая при этом трение и удары магнитных и алмазных частиц между собой и о стенку жесткой камеры. В результате происходит интенсивное диспергирование алмазного порошка, так как из-за малых поверхностей контакта при ударе на обрабатываемые алмазные частицы действуют большие нагрузки.

При использовании серийно выпускаемой дробилки модели МАП-2 существенное влияние на изменение гранулометрического состава порошка и формы зерен оказывает скорость вращения ротора. При увеличении окружной скорости ротора, постоянной производительности и одинаковой ширине щели обрабатываемый алмазный порошок становится более мелкозернистым. Высокая производительность обработки приводит к тому, что алмазный порошок получается менее равномерным по крупности, наряду с габаритными зернами содержатся мелкие осколки, чаще остроугольной формы. Это объясняется тем, что при высокой производительности обработки число контактов зерен между собой уменьшается, разрушение алмаза происходит главным образом за счет воздействия на него рабочих элементов аппарата, оваллизация практически отсутствует.

При электрогидравлической обработке происходит измельчение алмазов ударными волнами, которые создаются высоковольтным электрическим разрядом в жидкости. Физическую основу обработки составляет электрический разряд. Непосредственно превращение энергии электрического разряда в механическую обеспечивает высокий коэффициент полезного действия. Величина и длительность импульсного давления определяются мощностью разряда, а также свойствами рабочей жидкости. Электрическая энергия накапливается в конденсаторе, заряженном от высоковольтного выпрямителя, и колеблется от нескольких джоулей до 40 кДж. Напряжение конденсатора обычно составляет 0,03—60 кВ. Емкость конденсатора находится в пределах $0,05 \cdot 15$ мкФ, ток в импульсе составляет 15—50 кА.

Микropорошки, полученные путем дробления в электрогидравлическом аппарате, оседают со скоростью, в два раза превышающей скорость осаждения порошков такой же зернистости, но дробимым обычным методом, например в шаровой дробилке. Такие микрочастицы изометричны по форме, обладают повышенной прочностью, обеспечивают высокую абразивную способность.

Достоинством данного способа обработки алмазов является отсутствие металлического намола, в них полностью ликвидирована абразивная пыль.

Разрушению взрывной волной интенсивностью ниже (режим избирательного дробления) и выше (режим разрушения) динамической прочности бездефектных зерен в слое подвергались микropорошки зернистостью 60/40, 28/20,

10/7, 5/3. Порошки обрабатывались при помощи плоских ударных волн интенсивностью 2; 4; 6; 8; 10 МПа, возникших в результате взрыва над металлическим контейнером, внутри которого размещался плоский тонкий слой порошка.

После взрывной обработки порошки исследовались на фракционный состав, форму зерен, прочность и абразивную способность. Установлено, что в результате избирательного дробления микропорошков по концентраторам напряжений повышается средняя прочность зерен, улучшается их форма, повышается изометричность. Зерна основной фракции становятся более однородными по размерам, форме и прочности, в порошке отсутствуют частицы игольчатой и пластинчатой формы. Такое видоизменение качества алмазных микропорошков, обработанных взрывом, положительно влияет на повышение абразивной способности. Так, например, однократная взрывная обработка алмазов АСМ 5/3 с исходной абразивной способностью 1,4 ударной волной 6,0 ГПа повышает абразивную способность до 2,4.

Порошки, обработанные взрывом, обладают необходимыми полирующими свойствами.

Влияние обработки на изменение качественных показателей алмазных порошков. В процессе обработки алмазов в реакторе электромагнитного овализатора скорости удара алмазных частиц о стенку реактора, движущегося ферромагнитного элемента о зерно могут достигать скоростей шлифования. Для всех марок алмазов в процессе обработки характерным является изменение их гранулометрического состава. Наиболее заметные изменения происходят с зернами основной фракции, количество зерен которой уменьшается. Отношение процентного содержания части зерен основной фракции после обработки в аппарате $n_{обр}$ к исходному процентному содержанию основной фракции испытуемого порошка $n_{исх}$ называется коэффициентом сохранения основной фракции:

$$K_{с.о.ф} = n_{обр}/n_{исх}.$$

Алмазным порошкам повышенной прочности соответствует меньшее значение $K_{с.о.ф}$, алмазам с низкой проч-

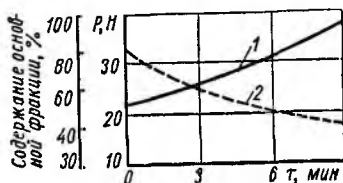


Рис. 5. Влияние овализации на изменение прочности P (1) и гранулометрического состава (2) алмазного порошка АСБ 250/200.

ромагнитного элемента о зерно могут достигать скоростей шлифования. Для всех марок алмазов в процессе обработки характерным является изменение их гранулометрического состава. Наиболее заметные изменения происходят с зернами основной фракции, количество зерен которой уменьшается. Отношение процентного содержания части зерен основной фракции после обработки в аппарате $n_{обр}$ к исходному процентному содержанию основной фракции испытуемого порошка $n_{исх}$ называется коэффициентом сохранения основной фракции:

ностью — более высокие значения данного коэффициента. Выявленная закономерность позволяет считать, что определенным маркам алмаза соответствуют и конкретные величины $K_{с.о.ф.}$, которые могут быть приняты за один из основных качественных показателей синтетических алмазов. Существенным отличием обработанных, овализованных в аппарате алмазов от обычных является более узкий диапазон изменения $K_{с.о.ф.}$, что свидетельствует о прочностной однородности зерен.

Влияние овализации алмазов на повышение их механической прочности показано на рис. 5. Если первоначальная прочность исходного порошка составляла 22 Н, то под воздействием овализации в электромагнитном устройстве прочность повысилась до 37 Н. Однако с повышением механической прочности наблюдается уменьшение основной фракции обрабатываемого порошка. Если содержание основной фракции в исходном порошке равнялось 80%, то после 9 мин овализации основная фракция составила 44%, за счет чего повысилась механическая прочность овализованных порошков.

Придание алмазным частицам округло-овальной формы освобождает поверхность от дефектных участков, поверхностных трещин, объемов с концентрацией напряжений. Поэтому порошки, состоящие из овализованных частиц, обладают повышенной механической прочностью.

Повышение термостойкости алмазов. Относительно низкий предел термостойкости алмазов вызвал необходимость в поисках путей его улучшения. Наметилось несколько способов повышения термостойкости: овализация алмазов, легирование шихты при снаряжении контейнеров для синтеза, покрытия алмазных порошков металлами, стеклом и др.

Установлено, что легирование исходного сырья бором позволяет создать разновидность синтетических алмазов с повышенной термостойкостью. Возрастает она и после овализации. Интересные возможности открываются в связи с совершенствованием способов металлизации алмазных порошков. Хотя окончательно роль металлических и других покрытий алмазных зерен выяснена не до конца, можно уже сейчас выделить их упрочняющее и тепловое экранирующее влияние.

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АЛМАЗНОГО ЗЕРНА С ОБРАБАТЫВАЕМЫМ МАТЕРИАЛОМ

РАЗРУШЕНИЕ ОБРАБАТЫВАЕМОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЕДИНИЧНЫХ ЗЕРЕН АЛМАЗА

Алмазные зерна играют главную роль в процессе взаимодействия шлифовального круга с деталью и в основном определяют съем припуска. Раздельное изучение работы единичного алмазного зерна и связки круга, а затем суммарного

воздействия рабочей поверхности круга позволило глубже проникнуть в сущность физических явлений, сопровождающих процесс алмазного шлифования различных материалов. Оно базировалось на работах, в которых были обстоятельно исследованы многие вопросы резания единичными зёрнами из абразивных материалов — электрокорунда, карбида кремния. В настоящем исследовании изучалось резание алмазными зёрнами естественной геометрии, что позволило сохранить исходный субмикрорельеф и, следовательно, обеспечить его участие в резании. О характере взаимодействия абразивного зерна с обрабатываемым материалом судили по результатам

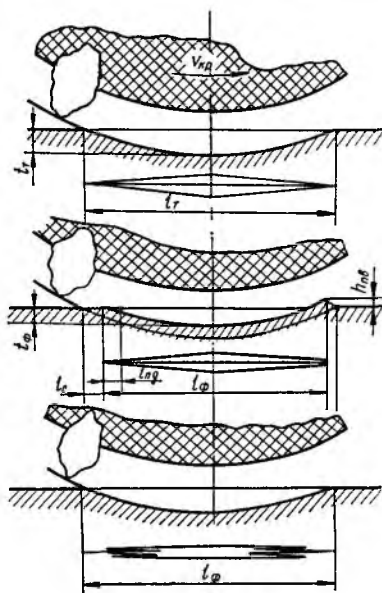


Рис. 6. Схема резания-царапания, соответствующая шлифованию периферией алмазного круга.

этого взаимодействия. Схема резания-царапания представлена на рис. 6.

Резание-царапание по схеме, соответствующей шлифованию периферией круга, позволяет изучить характер де-

формации при врезании зерна, резании на полную глубину и в момент выхода единичного зерна из обрабатываемого материала. В идеальном случае царапина должна точно соответствовать геометрическому следу зерна. Но если исходить из возможных видов взаимодействия единичного зерна с обрабатываемым материалом (см. гл. I), то следует учитывать, что при этой схеме резания-царапания $K = a_z/\rho$ не остается постоянным в течение времени контакта зерна с обрабатываемым материалом из-за того, что величина a_z увеличивается от нуля до определенного значения и снова падает до нуля; фактический передний угол изменяется при этом от максимального значения до минимального. Поэтому в начальный период абразивное зерно не производит резания, а скользит по поверхности обрабатываемого материала (участок l_c), затем начинается пластическое выдавливание материала, некоторое углубление зерна (участок $l_{n.д}$), и лишь после этого наступает микрорезание. Однако вследствие недостаточной жесткости системы СПИД и упругой деформации самих абразивных зерен последние внедряются не на теоретическую глубину t_r , а фактически на несколько меньшую t_ϕ . Выход абразивного зерна из контакта произойдет не в точке пересечения траектории вершины зерна с обрабатываемой поверхностью, а несколько выше, так как впереди зерна образуются вспучивания пластически деформированного металла. Это приводит к тому, что фактическая длина следа абразивного зерна l_ϕ отличается от теоретической l_r , а ширина в местах выхода следа зерна больше, чем в местах входа. Степень этого отличия уменьшается с увеличением твердости и жесткости абразивного зерна, а также с уменьшением ρ и α . Для алмаза они будут минимальны.

Характер и величина отклонений фактического следа зерна от теоретического приняты в качестве критерия оценки деформации обрабатываемого материала под воздействием зерен различных абразивных материалов. Эти отклонения фиксировались с помощью фотографирования царапин в плане (оптическая ось микроскопа перпендикулярна к плоскости шлифа), сравнения мест входа и выхода зерна, снятия поперечных профилеграмм.

Особенно эффективным оказалось использование в данных исследованиях электронной микроскопии. Электронная микрофрактография изломов материалов явилась важным средством изучения процессов разрушения. Хотя поверх-

ности, образующиеся на контактирующих материалах в процессе резания, в строгом смысле не являются собственно поверхностями раздела, соответствующими закритическому этапу разрушения (например, стружки и детали) вследствие вторичной деформации (например, от задней поверхности режущего инструмента), все же детальное изучение физического рельефа вновь образованных поверхностей дает немало ценной информации о самом процессе резания.

Резание-царапание закаленной стали. Царапины после алмазного зерна по характеру отличаются от царапин, выполненных единичным зерном электрокорунда. Внешнее отличие состоит в том, что после алмаза края царапин получаются более ровными, а весь контур царапины более четко очерчен. Сами царапины состоят из целого ряда рисок. Это же подтверждается в результате сравнений многочисленных снимков мест входа и выхода режущих зерен из обрабатываемого материала в процессе резания-царапания по схеме шлифования периферией круга при использовании зерен синтетического и натурального алмаза, а также у электрокорунда (все зерна одинаковой зернистости). Как правило, у электрокорунда и натурального алмаза в работе участвует одна вершина, а контур царапины у места входа и выхода очерчен двумя линиями. Соответствующий контур после резания зерном синтетического алмаза АСО сильно изрезан: царапина начинается большим числом рисок, которые по мере удаления от места входа сливаются, образуя одну общую царапину. Сильно развитая поверхность зерна синтетического алмаза обуславливает участие в работе нескольких вершин, работающих как самостоятельные режущие элементы. С увеличением глубины внедрения в обрабатываемый материал в работу вступает большая часть зерна; в контакт с обрабатываемым материалом вступают участки поверхности зерна, находящиеся во впадинах между вершинами, образуя сплошную режущую кромку. На выходе все происходит в обратном порядке.

Наблюдалась повторяемость картины, если не происходило выкрашивания отдельных режущих кромок или разламывания зерна. Снимаемая стружка представляла собой тело, расчлененное на тонкие волосовидные объемы, которые, сходя по неплоской передней поверхности, расходились веерообразно, «омывая» зерно и доходя до связки.

На различие процесса отделения стружки абразивным и алмазным зерном указывают профилограммы царапин в направлении, перпендикулярном к вектору скорости. По краям царапин после обработки зерном электрокорунда имеются вспучивания, образовавшиеся в результате пластического выдавливания обрабатываемой стали. После резания алмазным зерном в целом ряде опытов такого вспучивания не наблюдалось совсем, в других их площадь была существенно меньше площади вспучивания вдоль цара-

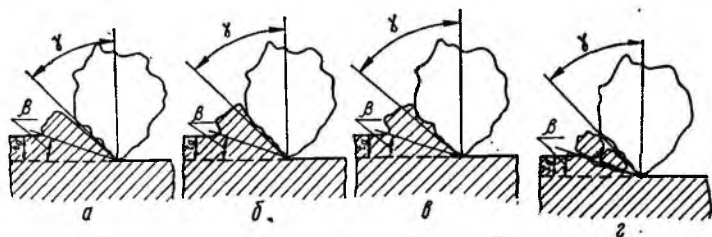


Рис. 7. Схема схода стружки при различных условиях микрорезания единичным алмазным зерном:

а — низкотемпературное; б — высокотемпературное; в — с наростом; г — резание хрупких материалов.

пины, нанесенной зерном электрокорунда. Условные напряжения микрорезания для алмаза намного ниже, чем для других абразивных материалов [69]. Установлено, что с повышением скорости резания уменьшаются навалы по краям царапин, в результате чего повышается коэффициент стружкообразования K_c . Например, повышение скорости в 550 раз увеличивает этот коэффициент при резании армко-железа и сырой стали ШХ15 на 10%, закаленной стали ШХ15 на 20% [56].

При резании-царапании со скоростью $V_{кр} = 20$ м/с обращает на себя внимание различный характер царапин на входе и выходе. В зоне выхода наблюдается более резкий переход от максимальной ширины до нуля, чему соответствуют более короткие участки перехода. Причиной отмеченного различия является образование нароста на алмазных зернах в процессе резания [42].

Алмазные зерна имеют отрицательные передние углы γ . Поскольку поверхности зерен синтетического алмаза имеют много выступов и впадин, в начальный период резания, а также при низких скоростях, когда влияние температурного фактора на закаленную сталь незначительно,

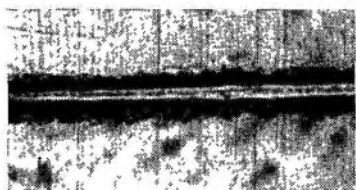
сдвигающиеся под углом β элементы стружки образуют точечный контакт с передней поверхностью алмазного зерна (рис. 7, а). С увеличением толщины среза a_z , а также скорости резания мощность теплового источника в зоне резания растет, в результате характер контакта изменяется, постепенно приближаясь к сплошному (рис. 7, б). Сходящую стружку все больше тормозят шероховатости алмазного зерна, образуются очаги схватывания и застоя обрабатываемого материала, приводящие к закреплению частичек стали на поверхности алмазного зерна. В этом случае в резании будет участвовать не только передняя поверхность алмазного зерна, но и участки уплотненного заторможенного металла, т. е. нароста (рис. 7, в). Последний изменяет режущий профиль зерна, что приводит к усилению пластических деформаций при резании-царапании алмазным зерном, хотя степень их продолжает оставаться меньшей, чем при абразивной обработке.

Данный вывод позже подтвержден рядом исследований [39, 78, 96]. Образованию нароста может способствовать и эвтектическое плавление алмаза в контакте со сталью при температуре 1150—1200°С [60]. После остывания капель состав их близок по составу к заэвтектоидным сталям. Эти объемы могут служить зародышами нароста. Образование нароста обнаружено на алмазных зернах хонинговальных брусков, для которых характерны более низкие температуры резания, чем при шлифовании. На возникновение нароста на алмазных зернах шлифовальных кругов указывалось также в ряде работ [39, 96]. Наросты, частично покрывающие поверхность алмаза, предохраняют их от графитизации при резании сырой и закаленной стали Р18, никеля и кобальта. Было установлено многократное увеличение силы микрорезания при появлении нароста («налипании частиц») на алмажном зерне [69].

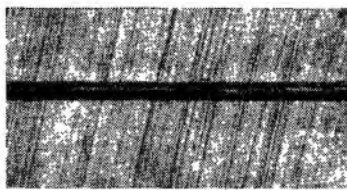
Резание-царапание твердых сплавов. Внедрению зерна КЗ в обрабатываемый твердый сплав предшествует скольжение по поверхности шлифа. Скольжение абразивного зерна объясняется тем, что в начальный период из-за недостаточной твердости и значительной округлости его вершины зерно не может внедриться в обрабатываемый материал. Углы резания при этом не благоприятствуют внедрению и съему материала. По мере дальнейшего перемещения зерна усилие P_y растет, действительные углы резания уменьшаются и зерно внедряется в твердый сплав. Увеличение

глубины внедрения увеличивает соотношение $K = a_z/\rho$, и условия для резания несколько улучшаются.

Съем стружки абразивным зерном сопровождается многочисленными хрупкими выламываниями сравнительно больших объемов твердого сплава (рис. 7, *з*). Выламываются частички, значительно превышающие размеры зерен карбида вольфрама. Окончательному отделению отламывающихся частиц предшествует вспучивание материала,



a



б



в

Рис. 8. Следы единичных зерен марок КЗ (*a*) и АСО (*б*) на твердом сплаве ВК6М и изменение следа зерна вследствие его выкрашивания (*в*).

подобное сферическим надломам. Характер этих надломов, а также неблагоприятная для чистого среза геометрия абразивных зерен могут служить достаточным основанием для утверждения об образовании стружки надлома в условиях несвободного резания (рис. 8, *a*). Поперечные профилограммы царапин после абразивного зерна подтверждают наличие больших вспучиваний и значительных вырывов. Это приводит к тому, что профиль царапины по ее длине не сохраняется постоянным. С повышением скорости царапания дно царапины и ее бока приобретают яркий блеск, прерываемый серыми пятнами крупных вырывов. Появление ярких белых полос можно объяснить действием высокой температуры.

На сплаве Т30К4 абразивное зерно оставляет след на поверхности шлифа, подобный тому, который остается от абразивного зерна на сплаве ВК6М в зоне, предшествующей внедрению, т. е. на участке скольжения. Это может служить подтверждением сделанного ранее вывода о том, что

твердость карбида кремния недостаточна для обработки высокотвердых инструментальных материалов.

Характер царапин после алмазных зерен имеет существенное отличие от описанного выше (рис. 8, б). Контур царапин в плоскости шлифа очерчен четкими линиями от места входа до места выхода. Края царапины более ровные, протяженность ломаных участков практически незначительна. Лишь в отдельных случаях наблюдались вырывы, зна-

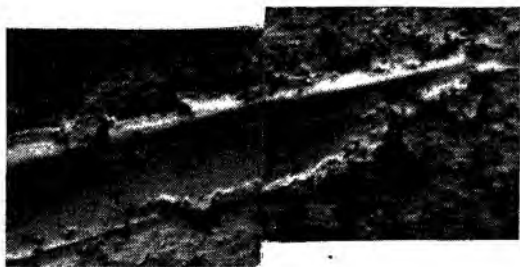


Рис. 9. Электронно-микроскопический снимок царапины на сплаве ВК6М при резании $v_{кр} = 25$ м/с единичным алмазным зерном, $\times 3000$.

чительно уступающие тем, что образуются при царапании абразивным зерном. Зона скольжения, предшествующая внедрению абразивного зерна, здесь отсутствует. Алмазное зерно сразу же при контакте с материалом начинает срезать стружку. Как и в случае резания быстрорежущей стали при резании-царапании твердого сплава зерном из синтетического алмаза в работе участвует несколько режущих кромок. В отличие от следа абразивного зерна на дне и боках царапин, произведенных алмазным зерном, крупные участки вырывов не обнаруживаются, хотя поры сплава хорошо наблюдаются (рис. 9). Царапина выполнена на поверхности шлифа после доводки карбидом бора, поэтому края ее не могут быть очерчены ровными линиями, так как исходная поверхность имеет сильно развитый рельеф. Поверхность дна и сторон царапины ровная, в отдельных местах наблюдаются небольшие пятна — места вскрытых пор сплава или мельчайшие вырывы. Такая поверхность может быть только после среза. В то же время на поверхности царапины не выявляются границы между отдельными зернами твердого сплава.

Поперечные профилограммы царапин от алмазных зерен подтверждают, что в большинстве случаев у краев царапин не наблюдается каких-либо признаков деформаций, что соответствует срезу. Однако в ряде случаев по краям

имеются небольшие хрупкие вспучивания. Количество и размеры этих вспучиваний весьма незначительны по сравнению с абразивными. В местах выкрашивания крупных частей алмазных зерен наблюдались значительные вспучивания обрабатываемого материала. На рис. 8, в видно, что широкая царапина в месте выламывания зерна исчезает и резание продолжается оставшейся режущей кромкой (узкая царапина). В месте выкрашивания наблюдаются темные пятна, которые могут соответствовать отколовшейся части алмазного зерна и внедрившейся затем в твердый сплав; к нему примыкает и охватывает его в определенной степени часть твердого сплава в виде сферического вспучивания.

Отмеченные закономерности резания-царапания твердого сплава ВК6М остаются справедливыми и для других марок твердого сплава, хотя различные марки их имеют и некоторые своеобразия, объясняющиеся различными физико-механическими свойствами. При резании-царапании сплавов с большим содержанием кобальта хрупких разрушений происходит меньше. Это проявляется и в уменьшении вырывов по краям царапин. С увеличением кобальта в сплаве возрастает вероятность возникновения двух взаимопроникающих скелетов — карбидного и кобальтового. Это уменьшает жесткость карбидного скелета, что и приводит к уменьшению хрупких разрушений и способствует большему проявлению среза.

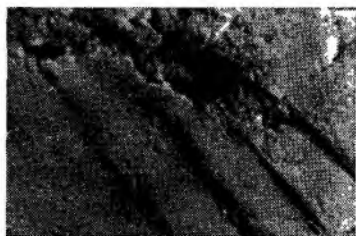
Подтверждением высокой эффективности резания твердых сплавов могут служить данные ряда работ [42, 52]. Удельная работа резания единичным зерном алмаза стали 40Х оказалась значительно ниже, чем для твердого сплава ВК15. Высокий, мало изменяющийся коэффициент стружкообразования характерен для широкого диапазона скоростей: от 5,10 до 27,5 м/с. Это означает, что при алмазном резании-царапании твердого сплава практически нет пластического оттеснения и объем стружки достаточно строго соответствует объему царапины.

Резание-царапание минералокерамики. Основные закономерности, установленные при изучении взаимодействия алмазного зерна с твердыми сплавами, подтверждаются и для минералокерамики ЦМ-332. Поэтому следует остановиться лишь на некоторых особенностях. Единичное алмазное зерно оставляет четкий след на поверхности шлифа минералокерамики, однако края царапин в этом случае

менее ровные, чем у твердых сплавов. Такое отличие, по-видимому, объясняется повышенной пористостью и высокой хрупкостью минералокерамики. При изучении в микроскопе и по фотоснимкам трудно отличить вырывы по краям царапин от пересекаемых зерном пор. На рис. 10, а след алмазного зерна пересекает в одном из направлений все поле снимков. Следовательно, алмазные кромки контактируют и взаимодействуют на этом отрезке пути с несколькими зернами. На этом отрезке пути следы от отдельных



а



б

Рис. 10. Участки следов единичных зерен алмаза:

а — марки АСО на минералокерамике ЦМ-332, $\times 3000$; б — марки АСК на поверхности поликристалла АСБ, $\times 5000$.

кромки алмазного зерна не исчезают и не прерываются крупными вырывами и сколами. Поверхность следа, оставленного на минералокерамике единичным алмазным зерном, представляет собой очень близкую к линейчатой поверхности (при шлифовании чашкой), образуемой перемещением прямой линии по контуру режущего профиля зерна.

Образование такого следа было бы невозможным в том случае, если бы в результате взаимодействия происходило раскалывание, дробление и вырывы отдельных зерен минералокерамики, так как режущая поверхность алмаза практически не являлась бы формообразующей.

Наличие неровностей у краев царапин недостаточно объяснять исключительно повышенной пористостью минералокерамики. Если отдельные вырывы наблюдались при резании алмазным зерном твердых сплавов, то они тем вероятнее для минералокерамики. При внедрении зерна и его движении обрабатываемый материал испытывает большие изгибающие напряжения у краев царапины, чем впереди и внизу режущего зерна, поэтому и проявление склонности минералокерамики к хрупкому разрушению ощу-

щается в большей степени. В местах, соответствующих середине царапины, материал в большей мере испытывает сжимающие и сдвиговые напряжения. Этому соответствует и характер разрушения зерен минералокерамики в результате взаимодействия с единичными алмазными зернами.

Резание-царапание синтетических поликристаллических алмазов. Синтетические сверхтвердые поликристаллы представляют собой многофазную систему, состоящую из кристаллических фаз (алмаз, металл-катализатор, карбиды, графит) и газовой фазы — пор. И хотя кристаллическая фаза (алмаз) является основной в поликристалле, физика твердого тела дает основание утверждать, что все компоненты в известной мере утрачивают некоторые свои индивидуальные свойства, а их система обретает новые, присущие только поликристаллу, например повышение предела прочности на сжатие и изгиб.

При шлифовании алмазов марок АСБ и АСПК в общем сохраняются закономерности разрушения природного алмаза, поскольку с некоторым приближением можно рассматривать алмазный кристаллит как подвергаемый обработке монокристалл. Однако структурные особенности — поликристаллическое строение, произвольная ориентация, широкий диапазон размеров и взаимное прорастание отдельных кристаллитов, а также наличие металлической фазы по межзеренным границам и внутри отдельных кристаллов — обуславливает специфические особенности механизма разрушения этих алмазов при шлифовании.

Главным отличием рассматриваемого взаимодействия является примерное равенство твердости обрабатываемого и обрабатывающего материалов. При столкновении алмазные зерна круга и алмазные поликристаллы мало деформируются. В этом случае главную роль играют волновые процессы [79]. Поскольку алмаз имеет высокий модуль упругости и малый удельный вес, то скорости упругих деформаций и связанные с ними скорости хрупкого разрушения значительно больше, чем у материалов с высокой плотностью и малым модулем упругости. При шлифовании алмазное зерно круга ударяет по поликристаллу. При малых глубинах резания наблюдались следы, напоминающие следы на пластичных материалах (рис. 10, б). С повышением нагрузки (глубины) появляются многочисленные микротрещины и хрупкое откалывание в пределах следа режущего зерна, особенно у его краев. Наличие микротрещин,

в том числе расположенных под углом к вектору скорости зерна, указывает на их затухание с удалением от поверхности контакта. Вследствие развитости субмикрорельефа алмазного зерна его контакт с поликристаллом означает участие в воздействии большого числа микрокромки, производящих «собственные» микроразрушения, суммирование которых определяет процесс разрушения поликристалла в целом.

Таким образом, удар порождает трещины, которые облегчают относительное перемещение режущего алмазного зерна и удаление припуска. По-видимому, это и компенсирует отсутствующее превышение твердости режущего материала над обрабатываемым. Перемещение зерна круга приводит к появлению растягивающих напряжений, максимум которых характерен для геометрического места точек, имеющего форму неполного кольца, перемещающегося за зоной контакта. Одновременно удар порождает импульс сжатия, который разлагается на продольную волну, распространяющуюся вдоль нормали к поверхности, и поперечную волну — в плоскости обработки. Естественно, что такое распределение напряжений обуславливает и сложность характера разрушения поверхностного слоя алмазных поликристаллов.

Принципиально возможность разрушения природных алмазов под действием волн напряжения показана в ряде работ, где разрушение связывалось с величиной критической нагрузки, скоростью ее приложения и количеством циклов. Когда продольная волна сжатия достигает внешней поверхности поликристалла, она отражается от него. Если поверхность свободна, то знак напряжения меняется на противоположный, т. е. при отражении от свободной поверхности волна сжатия переходит в волну растяжения, а волна растяжения — в волну сжатия [51]. При отражении от несвободной поверхности отраженная волна напряжения сохраняет знак первичной волны. Известно, что отражение волн происходит не только от границы тел, но и от поверхностей стыка между разными телами, если отношения модулей упругости и плотности этих тел не одинаковы [79].

В рассматриваемом случае острота микрокромки алмазного зерна обуславливает весьма ограниченную поверхность приложения нагрузки, которая меньше размеров отдельных кристаллитов. Анизотропия свойств алмаза и произвольная ориентация кристаллитов позволяют рассмат-

ривать их границы как границы тел с различными модулями упругости. С учетом этого и многофазного характера алмазных поликристаллов правомерно ожидать отражения волн напряжения от границ кристаллитов, которые могут быть частично свободными (поры) или несвободными (графит, металл, карбиды, кристаллиты алмаза).

Как видно из оптических и электронных снимков следов алмазных микрокромки на поверхности поликристаллов, края этих следов чрезвычайно развиты и имеют неупорядоченную форму. Это может быть следствием сложного отражения импульсов напряжения от поверхностей кристаллитов, форма которых в поликристаллах далека от геометрически строгой.

Следовательно, воздействие алмазного зерна на поликристаллы АСБ и АСПК можно представить следующим образом.

Острые микро- и субмикрокромки вследствие остроты и скорости воздействия порядка 20—35 м/с с ударом внедряются в поверхность кристаллита на незначительную глубину. После столкновения движение зерна продолжается. При этом наблюдается локальная пластическая деформация в тончайшем приповерхностном слое. Несмотря на это, характер соударения хрупких тел не изменяется, что проявляется в возникновении трещин и хрупких разрушений в окрестностях пятна контакта режущих кромок с поликристаллом. Одновременно с этим происходит многократное сложное отражение импульсов напряжений от границ отдельных кристаллитов, что может вызывать разрушение (откалывание) приповерхностных микрообъемов алмаза.

ЯВЛЕНИЕ АДГЕЗИИ И ДИФфуЗИИ В КОНТАКТЕ

В процессе шлифования имеет место физико-химическое взаимодействие абразивных зерен с обрабатываемым материалом. Подобное взаимодействие оказывает существенное влияние на износ традиционных шлифовальных кругов. Высокие удельные давления и температуры в зоне шлифования, а также образование весьма чистых ювенильных поверхностей контактирующих элементов способствуют протеканию окислительных процессов и возникновению адгезионных и диффузионных явлений в контакте.

Адгезионные явления. Как известно, алмаз обладает низким коэффициентом трения, что объясняется наличием

на поверхности алмаза прочноудерживающихся адсорбированных пленок. После очистки поверхности алмаза в вакууме коэффициент трения резко возрастает. Можно полагать, что при резании металлов трение свежееобнаженных поверхностей алмаза и металла соответствует условиям трения в вакууме, и при этом может иметь место прилипание частичек металла к алмазу [33].

При шлифовании, когда обработка ведется на высоких скоростях, имеет место контакт ювенильных поверхностей, так как пленки, препятствующие адгезии, не успевают возобновляться. В результате этого происходит схватывание металла с алмазом.

О возможности адгезионного взаимодействия отдельных кристаллов натурального алмаза указывалось в ряде работ [20, 42, 99]. Однако в них не определялся механизм схватывания алмаза с обрабатываемым материалом, в чем заключается физическая сущность явлений, сопутствующих адгезии. По одной из гипотез для сцепления необходимо сближение поверхностей на расстояние действия сил связи между атомами. Пленки на поверхности материала являются теми энергетическими барьерами, которые необходимо преодолеть. Наиболее дальнедействующими из атомных сил являются силы Ван-дер-Ваальса, радиус действия которых около 100 нм. Для начала действия этих сил расстояние между контактирующими парами должно быть именно такого порядка. Так как всякая поверхность не идеально гладкая, а имеет неровности, то практически без пластической деформации, при которой разрушаются поверхностные пленки, сближения на такие расстояния достичь невозможно. При раскалывании монокристалла по плоскости спайности неровности могут быть такого же порядка, как радиус межатомного действия [28]. Такая поверхность скола будет свободной от адсорбированной пленки. Следовательно, при шлифовании стали кругами из синтетических алмазов, исходя из установленного механизма износа зерен микровыкрашиванием и мелкими сколами, можно предположить, что на внедрившейся в обрабатываемую поверхность кромке алмазного зерна произошло частичное выкрашивание. Поверхность микроскола, безусловно, является чистой и контактирует с обрабатываемым материалом в процессе его пластической деформации. В этих условиях при наличии высокой температуры и контактного давления проявляется схватывание алмаза со сталью.

Метод электронной микрофрактографии позволяет изучить изношенные поверхности алмазных зерен. На электронно-микроскопических снимках поверхности синтетических алмазных зерен в круге после обработки быстрорежущей стали Р18 видны мельчайшие осповидные участки, свидетельствующие об адгезии, а также просматриваются более крупные пятна, являющиеся результатом среза или микроскола частей алмаза на поверхности алмазного зерна. Они



a



б



в

Рис. 11. Пластическая деформация алмаза, $\times 6000$:

a — осповидные участки; *б* — ряды фигур; *в* — пластические сдвиги.

невелики и составляют в большинстве случаев не более 1—2 мкм (рис. 11, *a*).

Для выявления условий, способствующих адгезии, определенный интерес представляет также возможность пластической деформации алмаза.

Исследования с помощью электронного микроскопа в отраженном свете полированного алмаза дали очевидные доказательства незначительного пластического течения поверхностных слоев [3]. При нагревании в вакууме кристалла алмаза до температуры 1800° С на его поверхности были обнаружены приподнятые участки, которые представляют собой ядра графитизации [98]. Эти ядра являются миниатюрными вулканами, которые прорвались сквозь поверхность горячего алмаза и вынудили его к пластической деформации. При шлифовании никеля одиночным алмазным кристаллом правильной

геометрической формы было обнаружено, что на задней его поверхности как бы произошли пластические сдвиги [33].

С помощью электронного микроскопа были получены микрофотографии поверхности синтетических алмазных зерен в круге после обработки быстрорежущей стали Р18, на которых ясно видны ряды фигур в виде треугольных впадин (рис. 11, б). Подобные линейно расположенные фигуры травления были получены при искусственном травлении кристалла натурального алмаза, что доказывало наличие в кристалле алмаза дефектов дислокационной природы, связанных с явлением скольжения [36].

Исходя из этого, можно полагать, что у синтетических алмазных кристаллов при шлифовании стальных материалов могут иметь место явления, связанные со скольжением.

На рис. 11, в видно, что на поверхности синтетического алмазного зерна произошли пластические сдвиги. Следовательно, поскольку при определенных условиях шлифования происходит пластическая деформация на поверхности алмазного зерна, то можно считать, что при совместной пластической деформации контактирующих поверхностей происходит схватывание алмаза с обрабатываемым материалом, что приводит к адгезионному износу алмазных зерен.

Схватывание алмазов с обрабатываемым материалом при шлифовании стали приводит к резкому увеличению нагрузок на зерне, в результате чего они могут выкрашиваться из круга крупными осколками, причем в ряде случаев отколовшиеся элементы зерна прочно удерживаются в контакте со стружкой, что также подтверждает наличие адгезии.

Диффузионные явления. Поскольку при резании единичными зернами происходит развитие адгезионных процессов в контакте стали и алмазного зерна, не исключено и возникновение диффузионных явлений. Возникновение адгезионной связи является необходимым условием протекания диффузии [59]. О возможности диффузии углерода из алмаза в обрабатываемый материал указывается в ряде работ [32, 33, 34]. В них установлено диффузионное растворение природного алмазного кристалла при различных условиях контактирования его со сталью: микрорезание кристаллом правильной геометрической формы, вакуумный отжиг алмаза в контакте с железоуглеродистыми материалами, измерение твердости металлов алмазным индентором при повышенных температурах. Возникновение и раз-

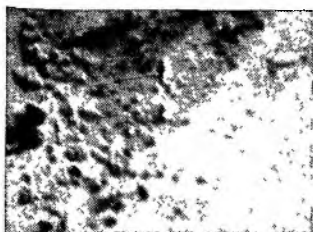
вите диффузионных процессов происходит и в условиях шлифования.

Механизм возникновения и развития диффузии углерода из алмаза в обрабатываемый материал можно представить следующим образом. В результате воздействия высоких температур, возникающих в микрizonaх схватывания алмаза с обрабатываемым материалом, может происходить диссоциация кристаллической решетки алмаза, т. е. атом, обладающий достаточной энергией, может переместиться из своего регулярного положения в узле решетки в «иррегулярное». Диффузия — это результат периодических перескоков атомов из одного узла решетки в другой [82]. Средняя частота перескоков атома на внешней (свободной) поверхности, участках дислокации и границах зерен гораздо выше, чем в решетке, скорость диффузии в них соответственно также больше.

Свободные поверхности у зерен синтетических алмазов образуются в результате их периодического скалывания. У синтетических алмазных зерен также обнаруживаются участки дислокации. Поскольку температуры в зоне контакта алмазного зерна с обрабатываемым материалом далеки от точки плавления алмаза, то будет иметь место анизотропия диффузии; в этом случае принято говорить, что диффузии присуща структурная чувствительность. Следовательно, далеко не из всех алмазных зерен, находящихся в контакте с обрабатываемым изделием, может диффундировать углерод. Диффузия при описанном механизме может происходить в том случае, если алмазные зерна будут ориентированы таким образом, что скол их произойдет по плоскости спайности, которая войдет в контакт с обрабатываемым материалом, либо выход дислокации произойдет в направлении обрабатываемой поверхности. Таким образом, диффузия углерода из алмазного зерна в стальные материалы может протекать в том случае, когда имеются факторы, облегчающие этот процесс и способствующие ускорению диффузии.

Диффузионное взаимодействие алмазов с металлами отмечено в ряде работ [34, 73]. Считается, что площадка на алмазном зерне, образовавшаяся в результате диффузионного процесса, характеризуется высокой гладкостью, причем на ней могут остаться риски от обрабатываемого материала, которые находятся в контакте с алмазным зерном. На рис. 12, а приведены электронно-микроскопические

снимки поверхности алмазного зерна после шлифования стали Р18. На микрофотографиях показана часть гладкой поверхности алмазного зерна, на которой просматриваются риски и изношенная в результате диффузионного растворе-



a



б

Рис. 12. Диффузионный износ зерен, $\times 6000$:

a — площадка на зерне; *б* — площадка на кромке.

ния синтетического алмазного зерна в стали режущая кромка, на которой образовалась небольшая гладкая поверхность износа (рис. 12, б). Это может служить косвенным подтверждением диффузионного износа синтетических алмазных зерен в шлифовальных кругах.

ИЗНОС И РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ЕДИНИЧНЫХ АЛМАЗНЫХ ЗЕРЕН

Алмазные шлифовальные круги обладают высокими режущими свойствами, что в первую очередь объясняется качеством самих зерен.

Для оценки сравнительной работоспособности единичных зерен были использованы синтетические алмазы марок АСР, АСВ, САМ, САБ, А. Кроме того, для сравнения при микрорезании твердого сплава применялись зерна зеленого карбида кремния КЗ-40. Закрепление зерен производилось без ориентации, следовательно, их расположение и механизм работы полностью соответствовали тем условиям, в которых они находятся на поверхности алмазоносного кольца в процессе работы круга.

Риски-царапины единичными зернами наносились на твердосплавных Т15К6 формы 0121 и быстрорежущих Р18 размером $25 \times 15 \times 8$ пластинках. Поверхность твердосплавных пластинок, на которую наносились риски-царапины, шлифовалась, после чего производилась тщатель-

ная доводка мелкозернистым кругом АСМ 10/7 100%-ной концентрации Б1 на связке. Поверхность быстрорежущих пластинок Р18 доводилась алмазным кругом зернистостью АСМ 28/20 100%-ной концентрации на связке Б1. Таким способом достигалась шероховатость $R_a = 0,04$ мкм. Шлифование-царапание производилось на плоскошлифовальном станке модели 3Г71. Диск с алмазным зерном закреплялся на оправке шпинделя, а пластинка с помощью индикатора выставлялась в тисках.

Режущая способность абразивных зерен характеризуется суммарной длиной кромок, принимающих участие в резании, а также их остротой. Макрошероховатость зерен определяется как отношение длины контура их проекции к площади этого контура [21]. При одинаковых свойствах материалов развитость режущей поверхности зерен оказывает преобладающее влияние на их поведение в работе. В этом смысле зерна синтетических алмазов имеют существенное преимущество по сравнению с натуральными. Искусственные алмазы представляют собой обычно массу негладких с шероховатой поверхностью кристаллов в то время, как для природного алмаза (борта) характерно наличие гладкой поверхности. Благодаря шероховатой зубчатой поверхности искусственных алмазов осуществляется хорошая механическая связь их в связующем веществе; другим фактором, свидетельствующим о превосходстве этих алмазов над природными, является то, что они более хрупкие и имеют способность, растрескиваясь, образовывать новые острые режущие кромки.

Представляет интерес изучение изменения режущей способности единичного синтетического зерна по мере его износа. Для этой цели проводились специальные эксперименты по микрорезанию с глубиной 5 мкм горизонтально выставленной пластинки. На микрофотографиях рисок-царапин единичного зерна на различных отрезках длины следа видно, что режущий профиль зерна устойчиво сохраняет развитость, каждая отдельно взятая кромка осуществляет срез материала, и при длине следа 300 мм не обнаруживает заметного износа. Некоторые кромки зерна в процессе работы выкрашиваются и след от них прерывается, однако большинство элементов единичного зерна стабильно наносит риски-царапины на поверхность. Было подсчитано число рисок-царапин через каждые 25 резов на поверхности пластинки после очередной подачи на глубину,

равную 0,005 мм. Результаты подсчета представлены на диаграмме (рис. 13). Как видно из диаграммы, число кромок (рисок-царапин), участвующих в работе, возрастает по мере износа зерна, что объясняется увеличением ширины его следа, т. е. в работе принимает участие большая поверхность зерна (рис. 13, а). Следовательно, режущая способность синтетического алмазного зерна по мере его износа до определенной степени не только не понижается, но ста-

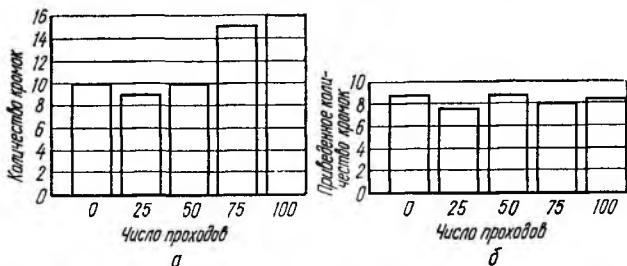


Рис. 13. Общее (а) и приведенное (б) изменение количества кромок зерна.

новится большей. Повышение режущей способности вызвано, главным образом, увеличением поверхности контакта зерна с изделием, когда в работу включаются новые периферийные режущие кромки. Поэтому был произведен подсчет приведенного числа рисок-царапин, т. е. их число, приходящееся на постоянную ширину следа зерна, равную 200 мкм (рис. 13, б). Из диаграммы следует, что по мере износа приведенное число кромок зерна остается примерно на одном уровне. Это характеризует высокую режущую способность синтетических алмазных зерен. В процессе шлифования происходит непрерывное самозатачивание режущей поверхности алмазного зерна за счет микровыкрашивания и обламывания притупившихся кромок и образования новых режущих элементов [65].

При изучении работы единичных зерен значительный интерес представляет их износ в зависимости от количества снятого материала. Сравнение внешнего контура после работы с предварительно выполненными микрофотографиями зерна до работы позволяет определить его размерный износ за период царапания. Наблюдение и изучение качественных изменений на поверхности единичных зерен после работы осуществлялось в отраженном свете на поляриза-

ционном микроскопе «Polmi». При отборе зерен в проходящем свете микроскопа для изготовления царапающих элементов предпочтение отдавалось зернам, имеющим круглую форму. Поэтому при подсчете объема изношенной части синтетических алмазных зерен с некоторым допущением можно считать их форму шарообразной. Определив размерный износ зерна при помощи наложения контуров до и после царапания, можно подсчитать объем изношенной части алмаза по формуле

$$V_{\text{изн}} = \frac{1}{3} \frac{\pi h_p^2}{10^9} (1,5d_s - h_p),$$

где $V_{\text{изн}}$ — объем изношенной части зерна, мм³; h_p — размерный износ единичного зерна за период царапания, мкм; d_s — диаметр зерна, мкм.

Износ алмазных синтетических зерен происходит постепенно, выломы крупных частей зерна не наблюдаются (рис. 14).

Съем материала единичным зерном определялся путем подсчета. Поперечная площадь сечения риски-царапины устанавливалась после измерения ее ширины и глубины. Изучение профиля рисков-царапин на двойном микроскопе и на профилографе показало, что их глубина вдоль одного следа зерна, т. е. на длине 30 мм, изменяется незначительно. Поэтому, приняв глубину царапины одинаковой, можно считать, что объем материала, снятый за один проход зерна, соответствует объему призмы. По такой же методике определяли объем снятого материала при царапании ма-

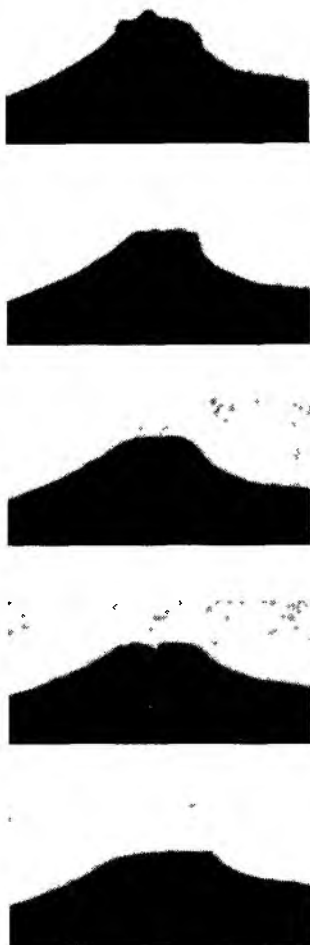


Рис. 14. Размерный износ зерна алмаза,

Объем снятого материала с любой i -й пластинки находят по формуле

$$V_i = F_{\text{ср}} l,$$

где $F_{\text{ср}}$ — средняя площадь сечения риски-царапины на данной пластинке; l — общая длина царапин на одной пластинке. Так как до полного фиксируемого износа зерно процарапает m пластинок, то общий объем снятого материала

$$V_{\text{св}} = \sum_{i=1}^m V_i.$$

Характеризовать работоспособность единичных зерен целесообразно отношением объема снятого материала к объему изношенной части зерна, т. е. коэффициент работоспособности

$$K = V_{\text{св}}/V_{\text{изн}}.$$

Например, для зерна, показанного на рис. 14, коэффициент работоспособности составляет 1100. Следует иметь в виду, что коэффициент работоспособности одного и того же абразивного материала может колебаться в определенных пределах. Особенно это относится к синтетическим алмазам, прочность которых весьма различна.

Интересные результаты дало изучение сравнительной износостойкости натуральных и синтетических алмазных зерен. Для большинства натуральных алмазных зерен формула для расчета объемного износа синтетических зерен может оказаться непригодной, так как их форма зачастую отличается от шарообразной. В каждом конкретном случае, при изучении поверхности зерен под микроскопом в отраженном и проходящем свете, а также характера их износа объем изношенной части определялся как объем соответствующей геометрической фигуры. Так, например, для зерен из природного алмаза А 250/200 в ряде случаев объем изношенной части может быть подсчитан как объем конуса. Поэтому, если принять это допущение, параметры изношенной части подобных зерен можно определить из поперечного сечения канавки.

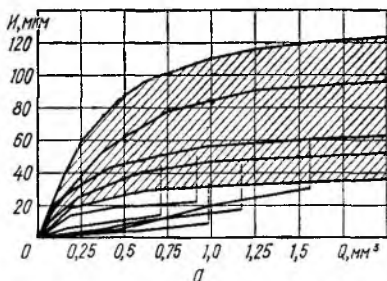
Следует отметить, что по характеру износа зерна природных алмазов отличаются от синтетических. Износ природных алмазных зерен происходит в результате сколов и истирания. Обладая большей прочностью по сравнению с синтетическими алмазами, они менее склонны к самозатачиванию своей режущей поверхности. Вследствие того, что у природных алмазных зерен в процессе работы образуются

площадки износа, в зоне шлифования возникают большие усилия, температуры, т. е. нагрузки на зерно возрастают, что в конечном счете приводит к образованию трещин на зерне и его излому. С другой стороны, обладая ровными гладкими гранями, природные алмазы значительно слабее синтетических удерживаются в связке. Воздействие повышенных нагрузок способствует расшатыванию зерна в связке, что в свою очередь облегчает его вырыв.

Наличие прямолинейных участков по контуру впадины — места, где находилось зерно, — подтверждает тот факт, что перед вырывом происходило частичное расшатывание алмазного зерна. Некоторые единичные зерна перед выпадением, смещаются в связке, оставляя на поверхности заметный след. Подобного явления при изучении работы единичных зерен из синтетических алмазов и их износа не наблюдается. Смещение зерна в связке алмазного круга может вызвать разрушение мостиков связи соседних зерен, в результате чего прочность их крепления будет резко снижена.

Различным механизмом работы и износа алмазных зерен из природных и синтетических алмазов объясняется неодинаковая износостойкость соответствующих алмазных кругов; удельный расход алмазов при работе кругами из натуральных алмазных зерен на органической связке выше, чем из синтетических.

Большое число экспериментов, проведенных с единичными алмазными зернами, позволило установить количественные зависимости их износа от объема снятого материала.



б

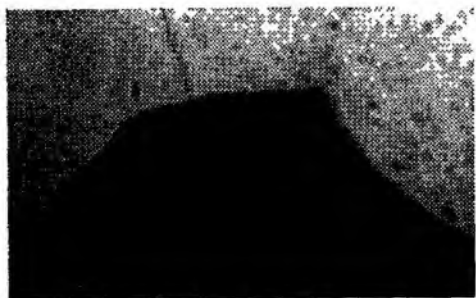
Рис. 15. Износ алмазных зерен при резании с $v_{кр} = 26$ м/мин, $S_{пр} = 0,3$ м/мин, $t = 10$ мкм:

а — зависимость размерного износа H от сдвига материала Q ; б — вид изношенной поверхности зерна.

Натуральные алмазные зерна обладают более высокой износостойкостью по сравнению с синтетическими (рис. 15, а). Кривые износа располагаются значительно ниже. Однако при дальнейшей работе преимущество приобретают синтетические алмазные зерна (заштрихованная зона). Как видно из приведенных графиков, натуральные алмазные зерна вырываются на различных стадиях царапания в зависимости от их ориентации и формы, не достигнув значительного износа; в то же время, зерна марки АСР продолжают участвовать в процессе резания и работают, как уже отмечалось, практически до полного износа, сохраняя режущую способность (рис. 15, б). Более быстрое микроразрушение с возобновлением режущих кромок соединяется здесь с лучшей механической связью и, как видно из графиков, общий объем снятого твердого сплава зернами АСР выше. В этом, собственно, и состоит основное преимущество синтетических алмазных зерен над натуральными в кругах на органических связках.

В начальный период работы зерен синтетических алмазов происходит более интенсивное их изнашивание: откалывание или излом наиболее выступающих кромок, после чего зерно начинает изнашиваться равномерно. При этом их износостойкость колеблется в довольно широком диапазоне. Результаты исследований показали, что коэффициент работоспособности даже зерен повышенной прочности АСР 250/200 изменяется от 200 до 3500. Прочностные свойства натуральных алмазов более стабильны и износостойкость их без учета выпадания зерен из связки изменяется в меньших пределах. Коэффициент работоспособности исследуемых зерен А 250/200 составляет 4000—7600. Обладая высокой прочностью, зерна синтетических монокристаллов марок АСК, САМ по характеру износа приближаются к натуральным алмазам. У них вследствие меньшей хрупкости самозатачиваемость хуже. Это приводит к образованию трещин на поверхности зерен, которые могут явиться причиной либо довольно крупного скола зерна, либо его поломки (рис. 16). С другой стороны, синтетический монокристалл, имея шероховатые грани, лучше, чем натуральный алмаз, удерживается в связке. В результате этого работоспособность кругов из синтетических монокристаллов будет выше, чем из природных.

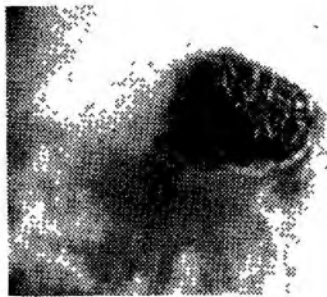
Кривые на рис. 17 построены по средним значениям опытных данных при резании-царапании 50 единичными зернами.



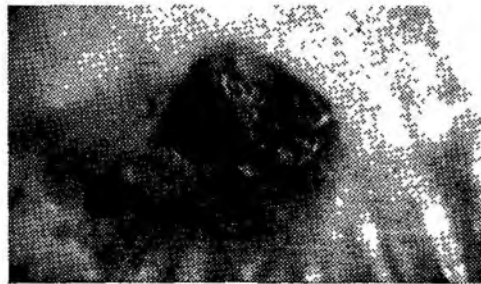
a



б



в



г

Рис. 16. Износ синтетических алмазных зерен монокристаллов:
a — зерно перед работой; *б* — после 750 мм пути; *в* — после 2250 мм пути, *г* —
 после 3750 мм пути.

Из приведенных зависимостей следует, что наименьший размерный износ имеют зерна натуральных алмазов (кривая 1), однако суммарная стойкость их низкая, зерна часто выпадают. По этой причине изготовление шлифовальных кругов на бакелитовых связках из зерен натуральных алмазов нецелесообразно. Круги на бакелитовых связках следует изготавливать только из синтетических алмазных зерен, так как они работают в круге практически до полного износа

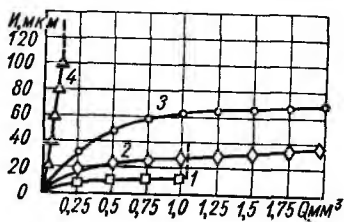


Рис. 17. Размерный износ различных материалов И:

1 — природный алмаз; 2 — синтетический монокристалл; 3 — синтетический алмаз марки АСР; 4 — КЗ.

и производят больший съем материала (кривая 3). Зерна синтетических монокристаллов занимают промежуточное положение между натуральными алмазными зернами и синтетическими (кривая 2). По прочности они почти не уступают натуральным и вместе с тем хорошо удерживаются в связке. Зерна зеленого карбида кремния обладают весьма низкой работоспособностью: при большом размерном износе съем твердого сплава незначителен (кривая 4).

Оптимальное значение коэффициента работоспособности для различных зерен в большой степени зависит от толщины среза. Толщина среза при шлифовании является главным фактором, влияющим на условные напряжения резания. При этом под условным напряжением резания понимается отношение усилия резания к площади среза. Усилия при микрорезании на реальной скорости ($v_{кр} = 26 \text{ м/с}$) измерялись с помощью специального динамометра с магнитоупругими датчиками, позволяющими регистрировать нагрузки на отдельные кромок при весьма малых толщинах среза (0,1—10 мкм). На рис. 18 приведены зависимости условных напряжений микрорезания от толщины среза. Для алмазных зерен увеличение толщины среза приводит к уменьшению условных напряжений резания во всем диапазоне изменения a_z , что подтверждает известное положение об уменьшении степени деформации срезаемого слоя при увеличении толщины среза.

Установленное изменение характера кривых в зоне малых толщин среза, т. е. рост условных напряжений резания с увеличением толщины среза, вызвано проскальзыванием

зерен по поверхности образца, сопровождающимся пластическим выдавливанием материала. Это объясняется неблагоприятным соотношением радиуса округления абразивных зерен и толщины среза. Как известно [38, 39], при соотношении $a_z/\rho = 0,5$ процесс резания превалирует над процессом пластического выдавливания. Считают, что процесс резания происходит при $a_z/\rho > 0,1$ [25], однако неясно, имеет ли при этом место хотя бы частичное пласти-

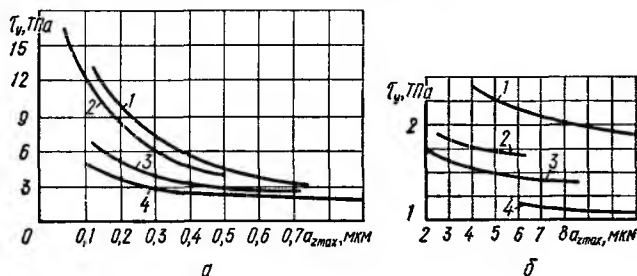


Рис. 18. Зависимость условного напряжения микрорезания τ_y для алмазов марок САМ (1, 4) и АСБ (2, 3) от толщины среза a_z :

$a - a_z = 0,1 \dots 0,9$ мкм; $b - a_z = 1 \dots 11$ мкм.

ческое выдавливание, в частности, на реальных скоростях шлифования в диапазоне толщин среза 0,1—0,5 мкм. Для толщин среза $a_z = 0,1 \dots 0,5$ мкм и радиусов округления алмазных зерен размером 250/200 $\rho = 2/5$ мкм соотношения a_z/ρ получаются весьма малыми ($a_z/\rho < 0,1$). Возникает вопрос о возможности процесса резания в указанном диапазоне величин. Монотонный характер кривых на рис. 18, a подтверждает высказанное предположение и свидетельствует о высокой остроте режущих кромок алмазных зерен и соизмеримости их радиусов округления с толщинами среза даже при микрорезании с $a_z = 0,1$ мкм.

Таким образом, анализ рисок-царапин при взаимодействии алмазных зерен с твердым сплавом и значений условных напряжений резания показывает, что процесс резания может осуществляться при соотношении $a_z/\rho = 0,05$, что значительно меньше благоприятных величин, установленных ранее. Следовательно, в зоне малых толщин на процесс резания существенное влияние оказывает субмикрорельеф алмазных зерен; наличие и роль субмикрорельефа в формировании обработанной поверхности, а также

в характере износа зерен отмечалось выше. Работоспособность алмазных зерен зависит от их физико-механических свойств и прежде всего от прочности микрокромки. Последняя оценивалась динамическими усилиями и предельными толщинами среза, при которых наступало разрушение микрокромки. С этой целью микрорезание осуществлялось с нарастающей глубиной.

Таблица 7

Средние разрушающие усилия и предельные толщины среза для алмазов различных марок

Марка алмаза	Разрушающая нагрузка микрокромки при динамических испытаниях		Прочность зерен при статических испытаниях
	Предельное усилие, Н	Предельная толщина среза, мкм	
АСР	53	0,586	6,0
АСВ	70	0,685	8,6
АСБ	86	0,738	9
САМ	120	0,860	18,6
АСБ	более	—	—
(овализованный)	160		

Предельное усилие на микрокромку определялось по максимальной амплитуде импульса на экране осциллографа; предельная толщина среза рассчитывалась по геометрическим параметрам канавки, прорезанной зерном на поверхности образца в месте его излома. Значения средних разрушающих усилий, вызывающих излом микрокромки и предельных толщин среза для алмазов различных марок зернистостью 250/200, приведены в табл. 7. Для сравнения здесь же приведены значения разрушающей нагрузки при статических испытаниях прочности зерен тех же марок [71].

Эти данные показывают, что наибольшей прочностью среди исследованных марок алмазов обладают овализованные зерна дробленых поликристаллических алмазов типа баласс (АСБов), предельную разрушающую нагрузку которых определить не удалось из-за недостаточной прочности закрепления зерен.

Существенное различие в абсолютной величине предельных нагрузок при статических и динамических испытаниях характерно для всех марок испытанных зерен. Это можно объяснить следующим. При кратковременном приложении нагрузки в динамических испытаниях возникающие в зерне деформации напряжения не успевают распространиться на значительные области, и воздействующее усилие локализуется на участке, непосредственно воспринимающем нагрузку. Поэтому вероятность попадания в зону кратко-

временных напряжений и деформаций дефектных участков алмазного зерна мала по сравнению со статическими испытаниями, где время приложения нагрузок практически не ограничено и зона их действия распространяется на большие участки зерна. Для зерен электрокорунда уровень измеряемых усилий до разрушения находится в пределе 5—150 [15].

Случайный характер размеров и форм микрокромки алмазов различных марок приводит к разбросу значений



разрушающих усилий и предельных толщин среза. Поэтому целесообразно рассматривать не только средние значения нагрузок, но и их распределение. Из кривой плотности распределения предельных толщин среза для зерен марки АСБ (рис. 19) видно, что наибольшее количество кромок разрушается при толщине среза $a_z = 0,7 \dots 0,8$ мкм, т. е. в этом диапазоне наступает интенсивное самозатачивание зерен, вызывая несколько повышенный их износ. Уменьшение значения толщины среза сопровождается ростом условных напряжений резания, особенно значительным для $a_z = 0,4$ мкм. При этом удельные нагрузки на режущие микрокромки существенно возрастают, что способствует их интенсивному выкрашиванию. Следовательно, можно предположить, что наиболее благоприятные условия работы алмазных зерен (например, АСБ), определяемые прочностью микрокромки и их остротой, создаются при толщине среза 0,4—0,7 мкм. Зависимость коэффициента работоспособности зерен АСБ от толщины среза, приведенная на рис. 19, подтверждает высказанное предположение.

При микрорезании быстрорежущей стали площадь контакта зерна с обрабатываемой поверхностью значительно больше, чем при обработке твердого сплава, так как модуль упругости быстрорежущей стали ниже. Поэтому

удельные нагрузки, которые испытывают режущие кромки алмазного зерна, падают, а это приводит к тому, что ухудшается самозатачиваемость режущей поверхности отдельных зерен. Синтетические алмазы при микрорезании стали обнаруживают износ в виде небольших сколов и выломов элементов зерна. Это, по-видимому, является следствием того, что синтетические алмазные зерна, имея шероховатую поверхность, при обработке пластичных материалов засаливаются. Засаливание режущей поверхности единичного зерна проявляется в том, что мельчайшие частички в виде стружек попадают в межкромочное пространство зерна и лишают его режущую поверхность развитости. Естественно, что такое засаливание приведет к резкому увеличению коэффициента трения между задней поверхностью зерна и обрабатываемой, силы резания и температуры в контакте также сильно возрастут. Следствием этих явлений и будет мелкий излом зерна.

Явление засаливания режущей поверхности единичных зерен происходит совместно с образованием наростов на отдельных режущих кромках. Учитывая шероховатую развитую поверхность зерен, можно полагать, что главной причиной наростообразования на них будет схватывание спрессованных частичек стали с обрабатываемым однородным материалом. Природные алмазные зерна обладают большей прочностью и имеют менее развитую поверхность, чем синтетические. Преобладающей причиной образования наростов в этом случае можно считать схватывание алмаза со сталью.

Глава III

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АЛМАЗНОГО КРУГА С ОБРАБАТЫВАЕМЫМ МАТЕРИАЛОМ

СУММИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЙ ЕДИНИЧНЫХ ЗЕРЕН АЛМАЗА НА ОБРАБАТЫВАЕМЫЙ МАТЕРИАЛ

В реальном процессе алмазного шлифования обрабатываемый материал испытывает воздействие большого числа алмазных зерен и связки круга. Отдельные зерна воздейст-

вуют на шероховатую поверхность, следы их многократно накладываются, а тонкий слой обрабатываемого материала подвергается разогреву в результате суммирования тепла от мгновенных источников. В поверхностном слое устанавливается градиент температуры. Происходят изменения и рабочей поверхности круга: изменяется режущий профиль алмазных зерен, уменьшается развитость рабочего профиля круга, ухудшаются условия для вмещаемости снимаемых стружек, интенсифицируются физико-химические процессы на контактных поверхностях. Все это свидетельствует об изменении условий работы режущих алмазных зерен, и, следовательно, о неизбежных различиях в удалении припуска в сравнении с резанием только единичными зернами алмаза.

Резание — процесс управляемого разрушения материала, составляющего припуск под обработку, с целью получения необходимой формы, размеров и качества деталей. При шлифовании особенностью разрушения является совместный механический и термический удар, длительность которого составляет доли секунды. Ударный характер воздействия усиливает неравномерность напряженного и деформированного состояния.

В пределах номинального контакта алмазного круга с деталью условия нагружения столь различны, что в этой зоне отдельные структурные составляющие могут находиться в упругом, пластическом, вязком состояниях, а также в состоянии разрушения. Состояние разрушения определяют как состояние, при котором вследствие развития трещин в теле началось нарушение его сплошности и непрерывности [79]. В случае шлифования оно является заключительной стадией развивающейся деформации и завершается отделением стружки. Характер деформационного микрорельефа, возникающего на обработанной поверхности, позволяет судить не только о закритической стадии разрушения, но и о состоянии разрушения.

Изучение деформационного микрорельефа облегчается выбором материалов, на изломе которых отчетливо просматриваются отдельные структурные составляющие. Непосредственным предметом исследования является не сама поверхность шлифа или детали, а ее отпечаток из электронно-прозрачного материала (реплика). Разрушение деталей рельефа определяется качеством воспроизведения структуры объекта соответствующим отпечатком. Подготовка объектов

исследования велась в такой последовательности. На поверхности хрупкого излома твердых сплавов, минералокерамики, закаленных сталей, синтетических сверхтвердых поликристаллов хорошо наблюдается зернистая структура, однако на поверхностях, обработанных алмазным шлифованием, она отчетливо не просматривается. Сравливание поверхности подтверждает, что структура приповерхностного слоя существенно отличается от тончайшего поверхностного. Поэтому образцы для исследования готовились следующим образом. Пластинки из исследуемого материала под действием изгибающего усилия разламывали и обработке подвергали поверхность хрупкого излома.

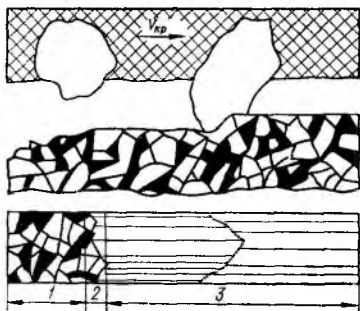


Рис. 20. Схема шлифования поверхности хрупкого излома.

Исходя из того, что в зоне входа режущего зерна в контакт с обрабатываемым материалом размазывание поверхности будет минимальным или отсутствовать совсем, шлифуемые образцы устанавливались так, что направление движения зерен круга всегда было одинаковым — от поверхности хрупкого излома к обработанной (рис. 20). Подготовленный к исследованию образец имел три зоны поверхности: поверхность хрупкого излома 1, обработанную поверхность 3 и переходную от хрупкого излома к обработанной 2. Поверхность хрупкого излома позволяет судить о характере излома отдельных структурных составляющих (зерен карбида вольфрама, карбида титана и окиси алюминия), а также оценить зернистость обрабатываемых материалов и контролировать однородность структуры пластинок в одной партии.

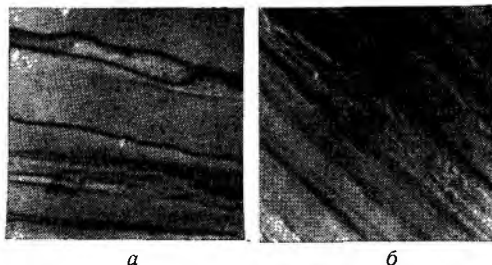
По состоянию отдельных зерен переходной зоны делалось заключение о характере и результатах их взаимодействия с алмазными зернами. Результатом суммарного взаимодействия круга и шлифуемого материала является состояние поверхности и поверхностного слоя. Многочисленные электронно-микроскопические снимки, а также визуальное изучение объектов в электронном и оптическом микроскопах подтвердили надежность принятой методики.

Обработка быстрорежущей стали. Внешний вид поверхности после обработки алмазным кругом представлен на

рис. 21. Характер риски на обработанной поверхности указывает на то, что стружки отделяются путем срезания и хрупкие разрушения не наблюдаются. При повышенной скорости в отдельных случаях наблюдались следы пластического выдавливания, но степень их и количество весьма незначительны. Поверхность же после шлифования электрокорундовым кругом резко отличается от поверхности, обработанной алмазным кругом: здесь хорошо видны следы интенсивного пластического течения. По-видимому, влия-

Рис. 21. Поверхность стали Р18 после шлифования ($S_{\text{п}} = 0,005 \text{ мм/дв}$ ход, $S_{\text{пр}} = 1 \text{ м/мин}$), $\times 3000$:

а — кругом ЭБ16 при $v_{\text{кр}} = 19 \text{ м/с}$; б — кругом АСО — 50% Б1 при $v_{\text{кр}} = 10 \text{ м/мин}$



ние температурного фактора при шлифовании кругами ЭБ столь значительно, что состояние материала в поверхностном слое закаленной стали Р18 резко изменяется, и пластические деформации становятся одним из существенных факторов формирования поверхности и всего поверхностного слоя. Выделяются стружки трех типов: тонкие волосовидные, почти ровные, напоминающие сливные; стружки с одной гладкой и другой слегка шероховатой стороной и толстые элементные стружки. Характер стружек говорит о том разнообразии условий, в которых работают отдельные зерна и их кромки в зависимости от размеров зерна, его положения и глубины залегания, режимов резания и т. д. В одних случаях стружка снимается легко, мало деформируясь, в других — претерпевает значительные деформации. Однако в опытах не обнаружено оплавления стружки — характерных шариков, которые часто встречаются при шлифовании кругами из обычных абразивных материалов. Это может служить подтверждением тому, что температурный режим при алмазной обработке менее напряжен, чем при абразивной. Многие стружки имеют на концах расчленение, соответствующее описанному характеру царапин на входе и выходе, когда отдельные кромки одного и того же зерна синтетического алмаза работают как самостоятельные режущие элементы. Этого не наблюдается

при резании зернами природного алмаза. При изменении режимов резания в пределах скорости резания $v_{кр} = 13 \dots 35$ м/с, поперечной подачи $S_{п} = 0,005 \dots 0,02$ мм/дв. ход и продольной подачи $S_{пр} = 1 \dots 4$ м/мин, а также при увеличении зернистости и концентрации не удалось установить заметных изменений типов стружек, однако соотношение их количества в общей массе изменяется. При этом резко возрастает макродеформация стружки, что связано с

Таблица 8

Работоспособность чашечных кругов

Характеристика круга	Продольная подача, м/мин	Поперечная подача, мм/дв. ход	Производительность обработки, см ³ /мин	Удельный расход алмаза, мг/см ³
АСКМ 125/100—МО4	1,0	0,05	0,13	31,3
АСКМ 125/100—МО4	5,0	0,05	0,45	62,4
КРМ 125/100—МО16	1,0	0,05	0,13	2,3
КРМ 125/100—МО16	5,0	0,05	0,45	3,4

ухудшением условий ее вмещаемости и интенсификацией физико-химического взаимодействия алмаза со сталью.

Как было показано, ужесточение режимов шлифования усиливает возникновение очагов налипания металла и образования наростов на алмазных зернах. Сход стружки в этом случае затрудняется, поскольку ей приходится перемещаться по поверхности нароста, что резко усиливает трение. С увеличением длины и толщины стружки она забивает межзеренные углубления на рабочей поверхности круга, в результате чего возникает контакт стружки с деталью, который приводит к возникновению трения стали по стали. В этих условиях потенциально высокие режущие свойства алмаза не могут реализоваться. Следовательно, в контакте режущей поверхности круга и детали важную роль играют не только фрикционные свойства связки, но и ее удаление от вершин выступающих зерен. Это положение особенно важно для шлифования торцом чашечного круга, когда путь алмазного зерна в металле и, следовательно, длина стружки велики (табл. 8 и 9) [58].

При круглом шлифовании стали Р12Ф5М, когда путь зерна в алмазе краток, алмаз проявляет более высокие режущие свойства, чем кубический нитрид бора. При шлифова-

нии торцом чашечного круга алмаз резко уступает по работоспособности кубическому нитриду бора.

Таким образом, изучение резания-царапания быстрорежущей стали Р18 единичными зернами, а также результатов

Таблица 9

Работоспособность кругов прямого профиля

Глубина шлифования, мм/дв. ход	КРМ 125/100—100%—МО16		АСКМ 125/100—100%—МО16	
	Производительность, см ³ /мин	Удельный расход алмаза, мг/см ²	Производительность обработки, см ³ /мин	Удельный расход алмаза, мг/см ²
0,0015	0,16	32,5	0,16	5,2
0,01	0,30	46,8	0,36	7,2
0,02	0,63	136,4	0,63	11,6

суммарного воздействия круга показало преимущества синтетического алмаза. Однако для реализации этих преимуществ необходимы умеренные температуры резания, обеспечиваемые при малых длинах пути алмазного зерна в метал-

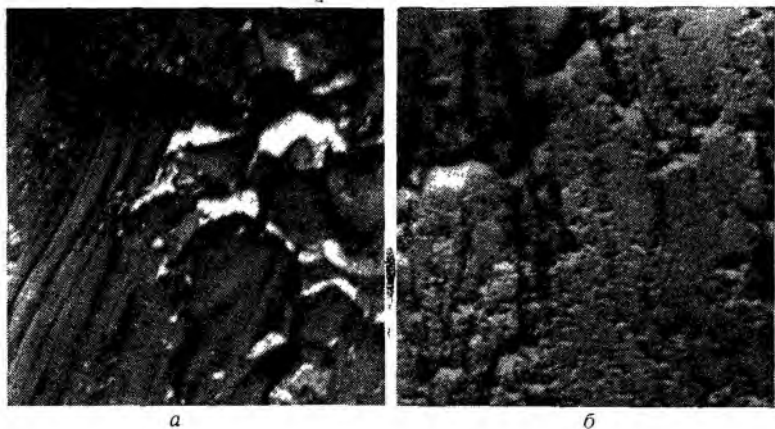
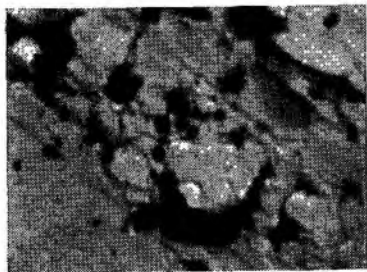


Рис. 22. Участки поверхности твердого сплава ВК6 после шлифования кругом карбида кремния К35 (а) и К340 (б), $\times 3000$.

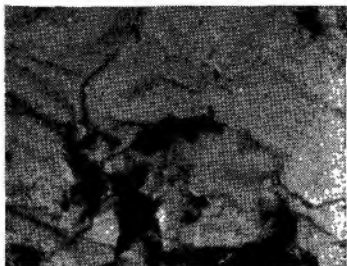
ле, хорошая вмещаемость стружки и высокие фрикционные свойства связки.

Обработка твердых сплавов. После обработки мелкозернистым кругом из карбида кремния на обработанной поверхности наблюдаются следы интенсивного пластического

границы отдельных зерен, хорошо наблюдаемые на поверхности хрупкого излома, скрыты. По поверхности распределен образующийся в процессе шлифования тончайший слой, по своей структуре и состоянию отличный от исходного материала. Слой имеет малую толщину (в отличие от размазанного слоя при абразивном шлифовании), в результате чего не скрываются характерные розетковые поры и мельчайшие вырывы (рис. 23). По своему характеру этот слой иног-



а



б

Рис. 24. Поверхность переходной зоны твердых сплавов ВК6 (а) и Т30К4 (б). Условия те же, что и на рис. 23.

да представляет собой сильно уплотненную массу порошкообразных частичек без заметных признаков пластичности.

Как видно из электронно-микроскопических снимков переходной зоны, образование распределенного слоя происходит в непосредственной близости от переходной зоны, поэтому наибольший интерес представляют те зерна, которые обработаны так, что на них имеются и поверхность излома и поверхность после обработки. На вершинах зерен сплава ВК6 (рис. 24, а) и Т30К4 (рис. 24, б) видны плоские площадки со следами режущих зерен алмазного круга. Направление всех этих следов совпадает. Следовательно, после обработки эти зерна хорошо удерживаются в поверхностном слое материала благодаря своим межзеренным связям. Следов сильного пластического течения не обнаружено, а значит, нет и затекания пластичного материала в межзеренные углубления.

Образование на зернах переходной зоны площадок обработки установлено для всех исследуемых марок твердых сплавов группы ВК и группы ТК. Характер этих площадок принципиально отличается от поверхности при хрупком изломе. На обработанной поверхности зерен нет

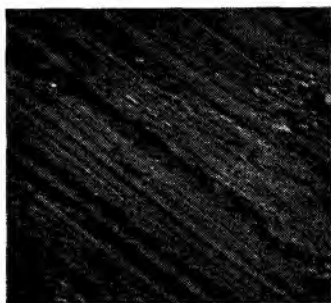
выкрашиваний, не проявляется какая-нибудь внутризеренная субмикроструктура, т. е. отсутствуют признаки, указывающие на природу хрупкого разрушения зерен карбидов в результате механического взаимодействия с алмазными зернами круга в условиях, когда влияние температурного фактора не существенно. Следовательно, в результате механического взаимодействия алмазного круга доминирующим видом разрушения зерен карбидов твердых сплавов является срез. Однако он не единственный вид разрушения. Неоднократно наблюдалось раскалывание зерен, претерпевших воздействие алмазного зерна (рис. 24, а). На это указывает наличие между рисками-следами значительного угла (порядка 20°). Очевидно, при срезе оставшаяся в поверхностном слое часть перерезанного зерна карбида вольфрама под действием усилий резания раскололась, связи оставшейся части с окружающими зернами и кобальтовой связкой при этом ослабели настолько, что произошел ее поворот на некоторый угол. Раскалывание приводит к микровырывам. Очевидно, этим и объясняется тот факт, что, хотя доминирующий при алмазной обработке срез обеспечивает высокую чистоту поверхности, а отсутствие сильного дробления, крупных вырывов, сильного пластического течения исключают ее ухудшение, все же величина микронеровностей составляет иногда значительную часть от среднего размера зерен сплавов. Установление возможного раскалывания зерен твердого сплава может служить исходным в объяснении образования режущей кромки затачиваемого инструмента.

Наличие среза как доминирующего вида разрушения структурных составляющих твердых сплавов при алмазном шлифовании обуславливает уменьшение объемов приповерхностных слоев материала, подвергаемых изменению, и способствует формированию поверхностного слоя деталей из более «здорового» материала, физико-механические свойства которого приближаются к исходным.

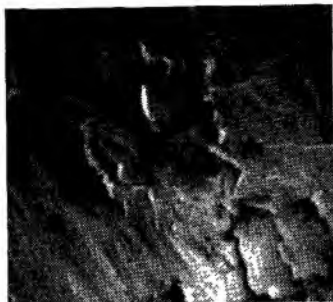
Обработка минералокерамики. После обработки минералокерамики абразивным кругом наблюдается неоднородность участков на обрабатываемой поверхности, что указывает на чрезвычайно разнообразный характер разрушения зерен материала в процессе шлифования. Даже при визуальном осмотре поверхности, обработанной кругом КЗ, можно отличить участки, напоминающие полированные, и участки с ярко выраженными следами дроблений и вырыв-

вов. Судя по характеру этих поверхностей, сколы происходят по отдельным зернам, тогда как при вырывах преобладает разрушение по межзеренным границам. Эти участки по характеру очень близки к поверхности хрупкого излома пластинок.

После обработки алмазными кругами поверхность имеет мягкий матовый оттенок, она более однородна, с четкими рисками-следами алмазных зерен. Алмазные зерна кру-



a



б

Рис. 25. Поверхность минералокерамики ЦМ-332, $\times 3000$. Условия те же, что и на рис. 23.

га оставляют ровный срез (рис. 25, *a*). В некоторых местах следы зерен алмаза прерываются зернами минералокерамики, поверхность которых напоминает поверхность хрупкого излома (рис. 25, *б*). По видимому, в этих местах зерна минералокерамики, ослабленные срезом, под действием усилий шлифования утратили связи с нижележащими слоями и выпали из поверхностного слоя.

На электронных снимках шлифованной поверхности нет признаков адгезионного взаимодействия алмаза и минералокерамики. Как известно, минералокерамика имеет очень низкую теплопроводность, в результате чего в тонком слое возможны высокие температуры, способные вызывать графитизацию алмаза. Коэффициент трения керамики по графиту в интервале температур $600\text{--}1500^\circ\text{C}$ имеет очень низкое значение [19]. Объясняют это взаимодействием керамики с углеродом, в результате чего образуются оксикарбиды и карбиды алюминия.

Обработка алмазных поликристаллов. Обработанная поверхность поликристаллических алмазов принципиально отличается от поверхности разлома, возникшей как

результат нарушения сплошности и отделения некоторого объема шлифуемого материала от его основной части. Первая несет на себе в основном следы хрупкого разрушения, свойственного алмазу, и близка принципиально к поверхности, образующейся при изломе поликристалла. Вторая — результат воздействия на обработанную поверхность связки шлифовального круга, осколков алмазных кристаллитов и изнашиваемых зерен. Это воздействие происходит



в условиях разогрева тончайших приповерхностных объемов поликристалла, окислительного влияния среды и графитизации.

Результаты оптических исследований [10, 11] указывают на общее внешнее сходство поверхностей поликристаллов АСБ и АСПК с поверхностями твердых сплавов и минералокерамики: организованные следы-риски от субмикрокромов алмазных зерен круга, многочисленные вырывы, сколы и поры. Часто наблюдаются клинообразные следы, острие которых направлено по вектору скорости. Наличие таких следов может доказывать интенсивный износ алмазных зерен, а также влияние температурного фактора на соотношение «горячих» твердостей.

Отличительной особенностью шлифованной поверхности син-

Рис. 26. Участки поверхности синтетического поликристаллического алмаза марки АСБ после шлифования кругом АСВ 100/80 — 100% — МВ1 ($v_{кр} = 25$ м/с, $S_{пр} = 1$ м/мин, $p = 0,1$ МПа), $\times 5000$.

тетических поликристаллических алмазов является наличие большого числа дефектов как бесформенных, так и в виде четко выраженных треугольников, которые представляют собой углубления, образовавшиеся в результате выбивания отдельных микрочастиц, микроблоков. Эти дефекты в известной мере являются наследственными и определяются особенностями структуры данных поликристаллов (рис. 26). Преимущественная по площади часть поверхности поликристаллов формируется под воздействием зерен круга уже после образования первичной поверхности раздела. Разрушающая роль этого воздействия все уменьшается,

наконец, на завершающем этапе преобладающим становится трение. В этом случае структура поликристаллов не просматривается. По электронным снимкам можно судить о происходящей пластической деформации в тончайшем слое, что возможно лишь в условиях высоких локальных температур. Такие участки чередуются со сколами. На многих участках следы обработки выражены слабо или совсем не наблюдаются.

МЕХАНИЗМ ИЗНОСА АЛМАЗНЫХ КРУГОВ

При взаимодействии режущей поверхности алмазного круга с обрабатываемым материалом в контакт вступают не только режущие алмазные зерна, но также зерна наполнителя и участки связки. В зависимости от концентрации алмазов изменяется и объемное содержание наполнителя в круге в пределах 43,75—12,5% для кругов 25—150%-ной концентрации. Следовательно, и физико-механические свойства алмазонасного кольца будут зависеть от соотношения количества зерен наполнителя и алмаза в кругах на бакелитовых связках и от количества алмаза в кругах на металлических связках. От качественного состава наполнителя (карбида бора, металлического порошка, электрокорунда и др.) зависят сопротивляемость износу, предел прочности при растяжении и статическом изгибе, удельная ударная вязкость, а также теплостойкость связки. Обуславливая такие свойства, наполнитель, естественно, будет влиять на механизм износа алмазных кругов. С увеличением твердости наполнителя удельный расход алмазов должен понижаться. Зерна наполнителя, изнашиваясь, дробясь и выламываясь, в значительной степени лишают алмазные зерна опоры, без которой последние не могут проявить в полной мере свои особые свойства.

На рис. 27 представлены микрофотографии поверхностей алмазных кругов после работы (рис. 27, а — круг АСО 100/80 — 150% — Б1). Зерна наполнителя (карбида бора) частично раздроблены и смещены. Раскалываясь на мелкие элементы, они выкрашиваются из связки. На зернах наполнителя образуются значительные площадки износа, на которых видны риски от обрабатываемой поверхности. Аналогичные снимки получены с поверхности специального безалмазного круга на бакелитовой связке, состоящего сплошь от зерен карбида бора (рис. 27, б).

Зерна наполнителя, разрушаясь, могут смещаться и даже разворачиваться в связке. Естественно, что после интенсивного разрушения, смещения и выпадания зерен карбида бора прочность мостиков связки алмазного зерна резко снизится, значительно уменьшится жесткость закрепления алмазных зерен. Все это способствует повышенному износу кругов низких концентраций на связке Б1, что подтверждается экспериментальными данными [65].



Рис. 27. Поверхность кругов на бакелитовой связке, $\times 400$:
а — круг на связке Б1; б — безалмазный круг; в — круг на связке Б3.

При взаимодействии режущей поверхности алмазного круга на связке Б3 с обрабатываемым твердым сплавом имеет место аналогичная картина (рис. 27, в). Учитывая более низкую твердость электрокорунда, можно предположить, что износ наполнителя в этом случае будет больше, а участие его в сьеме материала меньшее по сравнению с зернами карбида бора, который, как известно, способен царапать (доводить) поверхность твердого сплава. Следовательно, работоспособность алмазных кругов на связке Б1 при шлифовании твердых сплавов будет выше, чем на связке Б3, что подтверждается экспериментальными данными. При обработке стальных материалов, в частности быстрорежущей стали Р18, механизм взаимодействия наполнителя алмазного круга с обрабатываемой поверхностью изменяется. Карбид бора в присутствии кислорода воздуха под влиянием теплоты шлифования окисляется, что приводит к обезуглероживанию поверхностных слоев, изменению их свойств и интенсивному износу [92]. Химическая стойкость окисла Al_2O_3 по сравнению с карбидами, которые

могут химически реагировать под воздействием кислорода воздуха или образовывать соединение железа с углеродом, значительно выше [86]. Следовательно, наполнитель алмазного круга БЗ при шлифовании и доводке стали и быстрорежущих инструментов проявит большую стойкость, чем наполнитель круга Б1. Удельный расход алмазов при шлифовании быстрорежущей стали Р18 со скоростью резания $v_{\text{ср}} = 17,5$ м/мин, $S_{\text{п}} = 0,005$ мм/дв. ход и $S_{\text{пр}} = 1$ м/мин



а



б

Рис. 28. Поверхность кругов на связке М1, $\times 75$.

торцом чашечного круга одинаковой характеристики (зернистость АСО 80/63 концентрации 100%), но с разными наполнителями (Б1 и БЗ), составил: для круга на связке Б1 — $q = 5$ мг/г, а для БЗ — $q = 3,4$ мг/г. Как видно, удельный расход алмазов для кругов на органической связке с наполнителем из белого электрокорунда меньше. Таким образом, при шлифовании и доводке деталей и инструментов из стали применение кругов на связке БЗ более целесообразно.

Алмазные круги на металлических связках имеют свои особенности работы и износа, обусловленные тем, что они изготавливаются из более прочных алмазов марок АСР и весьма прочных алмазов марки АСВ, которые закрепляются в износостойкой и прочной связке. На микрофотографиях, представленных на рис. 28, видны площадки износа на алмазных зернах кругов АСР 200/160 — 50% — М1 (рис. 28, а) и АСР 315/250 — 50% — М1 (рис. 28, б). Вначале изнашиваются наиболее выступающие над поверхностью режущие кромки, затем образование площадок износа наблюдается одновременно на нескольких режущих кромках одного и

того же зерна. На притупившиеся алмазные зерна действуют повышенные нагрузки, в результате чего зерна могут частично скалываться, либо разрушаться. Разрушенное алмазное зерно имеет меньшее превышение над уровнем связки, но образует значительное число режущих кромок, которые могут участвовать в работе и положительно влиять на процесс шлифования. Следовательно, однозначное определение, например, зависимости высоты микронеровностей

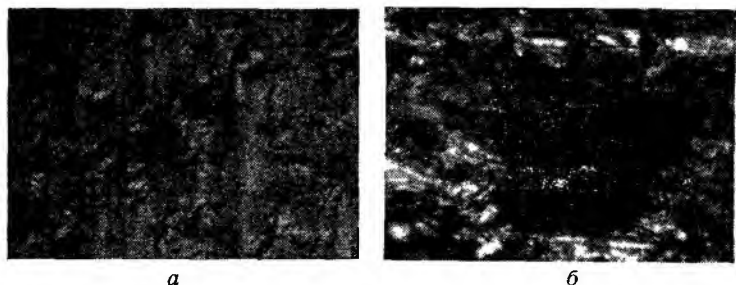
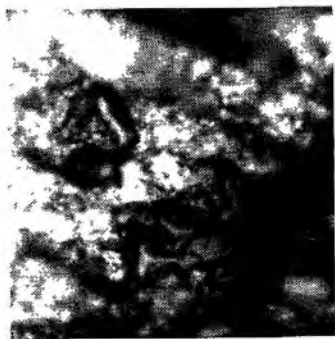


Рис. 29. Износ зерен марки АСВ в круге на связке М1:
а — расшатывание $\times 50$; б — место выпавшего зерна, $\times 440$

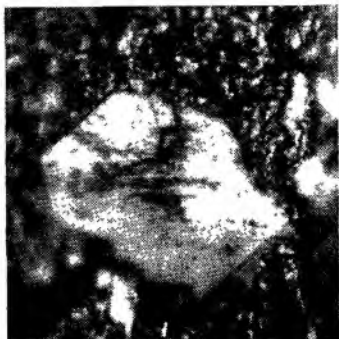
шлифованной поверхности или производительности от зернистости круга в ряде случаев может не иметь реального смысла, если не учитывать изменения состояния режущей поверхности алмазных зерен. Это изменение, в свою очередь, будет зависеть от воздействия различных по свойствам обрабатываемых материалов на алмазные зерна, вызывая их дробимость. Следует также иметь в виду, что весьма прочные алмазные зерна марки АСВ в кругах меньше подвергаются разрушению, чем зерна марки АСР, и с уменьшением зернистости дробимость, естественно, должна снизиться.

В ряде случаев отколовшиеся осколки зерен оставляют довольно глубокие следы при перекачивании по поверхности, находясь между обрабатываемой деталью и кругом. При подобном «пропахивании» поверхности круга алмазные зерна могут на своем пути смещать встретившиеся зерна, ослабляя тем самым прочность их закрепления или способствовать их вырыванию из связки. Под действием нормальных усилий отколовшиеся зерна могут вновь внедряться в связку и продолжать участвовать в съеме обрабатываемого материала. Выпадения зерен повышенной прочности марки АСР у кругов на бронзовой связке практиче-

ски не происходит. Весьма прочные зерна марки АСВ иногда вырываются из связки. При шлифовании они изнашиваются медленно, причем из-за их высокой прочности выкрашивание режущих кромок, как и у зерен марок АСО и АСР, происходит весьма редко. Образующиеся на зернах площадки износа приводят к увеличению нагрузок, в результате чего зерна могут расшатываться и вырываться из связки. На микрофотографии (рис. 29, а) поверхности кругов



а



б

Рис. 30. Поверхность зерен марки АСВ в круге:
а — развитая поверхность; б — площадка износа.

АСВ-100/80-100%-М1 после работы просматриваются места, откуда выпали зерна, а также хорошо видны результаты их расшатывания — смежные участки связки отодвинуты и не контактируют с боковой поверхностью алмазных зерен. На рис. 29, б показано место на поверхности круга, откуда выпало алмазное зерно. Наличие прямолинейных участков по контуру впадин свидетельствует о том, что в процессе работы происходило частичное расшатывание зерна в связке, после чего оно было вырвано.

Алмазные зерна в кругах на металлических связках в зависимости от их расположения и ориентации подвергаются различным видам износа. Скалывание режущих кромок, а также отдельных небольших элементов алмазных зерен способствует образованию развитой поверхности с большим числом вновь образовавшихся острых кромок (рис. 30, а). В результате ударов об обрабатываемую поверхность на алмазных зернах могут возникать трещины, образование которых предшествует излому и выкрашиванию алмазных зерен. После разрушения и вырывов зерен на

2

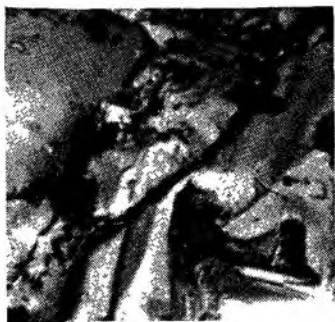
поверхности круга может находиться большое количество мелких осколков, которые либо остались на местах зерен, либо вдавились в смежные участки связки. В ряде случаев на алмазных зернах образуются значительные площадки износа. Подобный вид износа наиболее характерен для кругов повышенных концентраций. В зависимости от концентрации алмазного круга количество зерен одинаковой крупности на поверхности круга будет различным. В связи с этим алмазные зерна кругов меньших концентраций при остальных равных условиях будут испытывать значительно большие нормальные нагрузки и поэтому износ их будет происходить, как правило, выкрашиванием (рис. 30, а, круг АСР 100/80 — 100% — М1). Зерна в кругах высоких концентраций подвержены меньшему силовому воздействию. В связи с этим преобладающим фактором, влияющим на износ, является в этом случае истирание. На микрофотографиях (рис. 30, б, круг АСР 100/80 — 200% — М1) показаны алмазные зерна с площадками износа, которые образуются вследствие истирания зерен при высоких скоростях трения ($v_{кр} = 25$ м/с), когда от алмаза отрываются мельчайшие частички, которые под действием высоких температур превращаются в аморфный углерод [98].

4

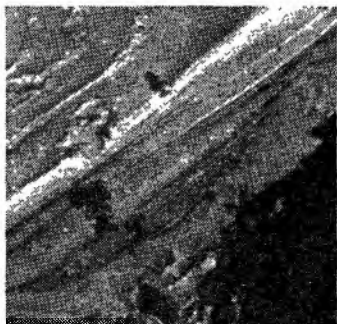
Вероятным видом износа является и абразивный износ алмазных зерен. На фотографии алмазного зерна (рис. 30, б) видны следы абразивного воздействия карбидов твердого сплава. Как известно, по своим свойствам алмаз анизотропен и, следовательно, ему присуща анизотропия трения. В направлении высокого значения коэффициента трения алмаз подвергается абразивному износу, так как при этом легко достигается высокая температура контакта.

Изучение поверхности алмазных зерен и характера их разрушения после шлифования производилось также методом электронной микрофрактографии на электронных микроскопах ЭМ-5 и УЭМВ-100. Рельеф поверхности алмазных зерен и характер износа изучался с помощью угольных реплик, точно копирующих характер исследуемых поверхностей и получаемых методом двухступенчатого отпечатка. Исследовались поверхности алмазных зерен в кругах на бакелитовой связке 200%-ной концентрации, т. е. без зерен наполнителя, и в кругах на бронзовой связке М1. На рис. 31, а показана разрушенная режущая кромка алмазного зерна. На его поверхности видно значительное количество небольших изломов, определяющих разви-

тость режущей поверхности. Когда выступание отдельных режущих кромок алмазного зерна невелико, их разрушение происходит в виде мельчайших сколов (рис. 31, б), причем на поверхности зерна, примыкающей к кромке и воспринимающей ударное воздействие перед внедрением зерна в обрабатываемый материал, образуются террасообразные сколы.



а

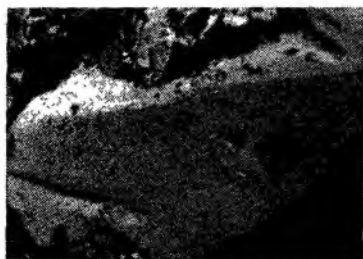


б

Рис. 31. Износ и образование микрокромки, $\times 3000$:
а — микроскол кромки; б — образование террасообразных сколов.

Эти новые кромки алмазного зерна весьма остры и микроплощадки на них во многих случаях не превышают одного микрометра. При изучении процесса царапания твердого сплава единичными алмазными зернами было отмечено, что глубина следа на входе зерна в материал составляет один микрометр и менее. Кроме того, наличие таких острых кромок на алмазном зерне во многом предопределяет тот факт, что скольжение зерна на поверхности обрабатываемого материала практически отсутствует и оно сразу принимает участие в работе резания-царапания. Этим в значительной степени объясняется меньшая напряженность процесса шлифования алмазными кругами. При определенных условиях на алмазных зернах могут образовываться площадки износа, однако при более тщательном рассмотрении на этих площадках можно увидеть большое число выступов и впадин, образованных в результате мельчайших сколов. На рис. 32, а представлен осколок алмазного зерна, имеющий выраженную площадку, в центре которой едва заметны лишь небольшие следы сколов. При большем увеличении (рис. 32, б) на подобной площадке износа можно увидеть значительное число выступов и впадин, которые

при рассмотрении в обычном оптическом микроскопе находились естественно в одной фокальной плоскости и представляли собой площадку износа. Таким образом, вследствие хрупкости материала алмазного зерна и особых физико-механических свойств площадки износа не являются абсолютно ровными и гладкими, хотя превышение выступов над впадинами составляет доли микрометра. Понятно, что подобная развитость микроплощадки износа не будет



a



б

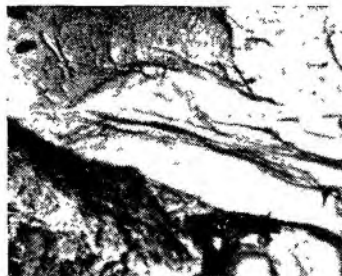
Рис. 32. Поверхность износа зерен:

a — видимая площадка, $\times 3000$; *б* — развитый субмикрорельеф, $\times 20000$.

оказывать влияния на способность зерна внедряться и производить сьем материала. Но эти микронеровности на кромках являются очагами трещин и причиной выкрашиваний отдельных режущих элементов, вызывая самозатачиваемость синтетического алмазного зерна и обеспечивая тем самым его высокую режущую способность.

Износ кругов из алмазов марки АСБ имеет некоторые особенности, связанные как с поликристаллической структурой, так и с методом получения абразивных зерен дроблением. При исследовании методом электронной микрофрактографии изучались поверхности зерен, предварительно наблюдавшиеся в обычном оптическом микроскопе. С этой целью высечка на отпечатке производилась по метке, которая была нанесена на круге и отчетливо просматривалась на реплике. Электронно-микроскопические снимки свидетельствуют, что площадки износа не являются гладкими и ровными, а имеют развитую поверхность с мельчайшими выступами и впадинами (рис. 33, *a*). Размеры этих неровностей находятся в пределах от десятых долей до нескольких микрометров. Следовательно, площадки износа, контактирующие с обрабатываемой поверхностью, участвуют в съеме материала, внедряясь в него своими микрокромками.

Разрушение площадок износа зерен в процессе работы круга происходит вследствие сколов и микровыкрашиваний отдельных кромок (рис. 33, б и в). Их появлению предшествуют зарождение и развитие микротрещин в зерне, возникающих в результате распространения волн деформаций при динамической нагрузке на кристаллы алмаза [88]. Трещинообразованию способствует также поликристалли-



а



б



в

Рис. 33. Поверхность зерен марки АСБ после работы, $\times 4000$:
а — развитый рельеф; б — развитие трещин; в — локализация трещин.

ческий структура абразивного материала. На рис. 33, б заметно развитие трещин по длине и глубине зерна, наблюдается анизотропный характер их распространения, ко-

торый приводит к микросколу отдельных участков поверхности износа зерна размером 10 мкм.

Ввиду того, что алмазы марки АСБ представляют собой поликристаллические образования, развивающиеся трещины локализуются на границах отдельных кристаллитов (рис. 33, в). Это способствует ограничению распространения трещины по всему зерну, выходу ее на поверхность, определяет механизм износа зерен марки АСБ микровыкрашиванием.

ДИНАМИКА И ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ ПРОЦЕССА АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ

СИЛЫ РЕЗАНИЯ

Силы, возникающие при шлифовании, обуславливают износостойкость алмазных кругов, качество обработки и выбор оптимальных технологических параметров шлифования. При заточке и доводке инструмента микрогеометрия кромки, рабочих поверхностей и состояние поверхностного слоя в значительной степени зависят от сил резания, знание закономерностей изменения этих сил позволяет обоснованно выбирать оптимальные условия обработки, обеспечивающие требуемое качество режущей части инструмента. По характеру изменения сил резания можно также косвенно судить о физических явлениях, протекающих в зоне резания, и тепловой напряженности процесса при различных условиях алмазного шлифования. Представляет интерес соотношение сил резания при шлифовании, которое в определенной мере характеризует эффективность работы алмазного круга.

Влияние различных факторов на силы резания исследовалось при шлифовании следующих инструментальных материалов: ВК2, ВК4, ВК8, Т15К6, ЦМ-332, Р18. Обрабатывались образцы сечением 6×15 мм. Шлифование производилось на универсально-заточном станке модели ЗБ642 торцом чашечного круга АЧК1 — 25×10 . Исследования были выполнены при работе кругами различных характеристик: зернистостью АС 40/28 — АС 160/125 25—200%-ной концентрации на связках Б1, К1, К5, М1. Скорость резания изменялась в диапазоне 10—40 м/с; продольная подача 0,5—5,0 м/мин, поперечная подача — 0,01—0,05 мм/ход. Измерение сил резания осуществлялось при помощи трехкомпонентного динамометра УДМ конструкции ВНИИ.

В результате исследований установлено, что увеличение зернистости круга до АС 100/80 приводит сначала к некоторому уменьшению сил резания, а при дальнейшем увеличении зернистости силы резания возрастают (рис. 34). Это можно объяснить тем, что у мелкозернистых кругов вследствие незначительного выступания алмазных зерен над

связкой усиливается контакт связки с обрабатываемым материалом и, следовательно, увеличиваются силы трения. Кроме того, росту сил резания при работе мелкозернистыми кругами может способствовать снижение температуры в зоне резания. При этом поверхностный слой обрабатываемого материала слабее размягчается. Для внедрения в более твердый поверхностный слой вершин алмазных зерен и отделения от него срезов потребуются приложении больших усилий. Взаимодействие связки с обра-

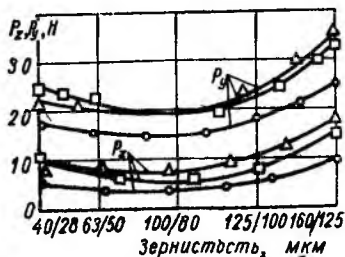


Рис. 34. Влияние зернистости алмазного круга на силы резания (круг 100%-ной концентрации на связке Б1, $v_{кр} = 30$ м/с, $S_{пр} = 1,0$ м/мин, $S_{п} = 0,01$ мм/дв. ход) при шлифовании различных материалов: $\Delta - \Delta -$ ТЗК4, $\square - \square -$ ЦМ-332, $\circ - \circ -$ ВК4

батываемым материалом уменьшается с ростом размера алмазных зерен, что вызывает снижение сил трения. Но одновременно при этом ухудшается соотношение толщины среза a и радиуса округления алмазного зерна. Последнее вызывает рост удельных сил резания. Наиболее благоприятное сочетание этих противоположно влияющих на силы факторов наблюдается у кругов зернистостью АСО 100/80, при работе которыми возникают минимальные силы резания.

С увеличением концентрации алмазов в круге силы резания существенно уменьшаются (рис. 35). Наиболее интенсивное снижение сил резания наблюдается при изменении концентрации от 25 до 100%. В этом случае силы резания уменьшаются в 4—6 раз. С дальнейшим ростом концентрации

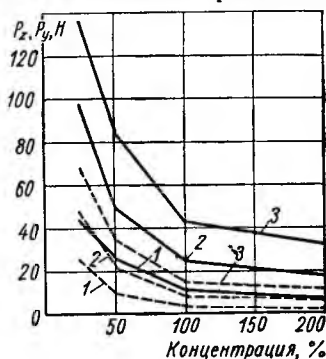


Рис. 35. Влияние концентрации алмазов в круге на силы резания P_z (штриховая линия) и P_y (сплошная линия) при шлифовании твердого сплава ВК4 кругом АСО 100/80 — Б1 ($v_{кр} = 30$ м/с, $S_{пр} = 1,0$ м/мин):

1 — $S_{п} = 0,01$ мм/ход, 2 — $S_{п} = 0,03$ мм/ход; 3 — $S_{п} = 0,05$ мм/ход.

до 200% силы резания снижаются всего лишь на 20—30%. Зависимость сил резания от концентрации можно объяснить изменением суммарной площади контакта участков связки. Как известно, у кругов 25%-ной концентрации на связку и наполнитель приходится 93,75% объема алмазносного слоя, а у кругов 200%-ной концентрации их содержание снижается до 50%. Соответственно этому уменьшается контакт связки с обрабатываемой поверхностью. Менее интенсивное снижение сил резания при изменении concentra-

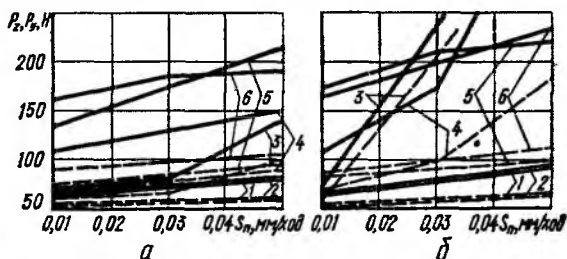


Рис. 36. Зависимость сил резания P_z (штриховая линия) и P_y (сплошная линия) от поперечной подачи при шлифовании твердого сплава ВК4 кругами различных характеристик ($v = 30$ м/с и $S_{пр} = 1,0$ м/мин) с охлаждением (а) и без охлаждения (б): 1 — АСО 100/80 — 100% — Б1; 2 — АСР 100/80 — 100% — К1; 3 — АСР 100/80 — 100% — КБ; 4 — АСВ 100/80 — 100% — М1; 5 — КЗ — 6 — Б1; 6 — КЗ — 25 — МЗК.

ции алмазов от 100 до 200%, по-видимому, вызвано тем, что в этом случае с ростом количества зерен на рабочей поверхности круга, наряду с уменьшением контакта связки, уменьшается сечение единичного среза. Последнее приводит к ухудшению соотношения толщины среза и радиуса округления вершины зерна, а также к росту удельных сил резания.

При работе кругами на органической и керамической связках (Б1 и К1) силы резания примерно одинаковы, а при шлифовании кругами на связке М1 силы резания в 3—5 раз больше (рис. 36). Это вызвано тем, что пластичная металлическая связка может заволакивать алмазные зерна и заполнять углубления на рабочей поверхности круга. При этом трение между связкой и обрабатываемым материалом возрастает. У кругов на органической связке Б1 наличие зерен наполнителя карбида бора, которые в определенной

степени могут участвовать в резании, уменьшает контактные участки трения связки и обрабатываемого материала. Это снижает отрицательное влияние связки на силы резания. У керамических связок К1 вследствие их значительной хрупкости засаливание рабочей поверхности круга не наблюдается, что также приводит к снижению сил резания. При работе без охлаждения кругами на керамической связке К5, имеющей в своем составе металлический наполнитель, возникают значительно большие силы резания, чем у кругов на связке К1. При работе с охлаждением и $S_n = 0,03$ мм/ход значения сил для кругов на связках К1 и К5 примерно одинаковы.

Необходимо отметить, что влияние смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) на силы резания в значительной степени зависит от характеристики круга. Так, алмазные круги на металлической связке М1 и керамической К5 (с металлическим наполнителем) сильно реагируют на наличие или отсутствие СОЖ. У этих кругов силы резания при работе без охлаждения в 2—3 раза больше, чем при работе с охлаждением. С ростом поперечной подачи силы резания настолько интенсивно увеличиваются, что при $S_n = 0,03$ мм/ход становятся даже большими, чем у абразивных кругов. В этом случае на рабочей поверхности алмазного круга образуются прочно удерживающиеся металлические наплывы, которые непосредственно контактируют с обрабатываемым материалом. При работе с охлаждением такие явления отсутствуют и это значительно снижает возникающие силы резания. У алмазных кругов на связке Б1 и К1 при работе без охлаждения и с СОЖ силы резания изменяются сравнительно мало. Подобная закономерность сохраняется при работе абразивными кругами К3 на бакелитовой и керамической связках (рис. 36).

Характер влияния СОЖ на силы резания подтверждается исследованиями [69] при микрорезании алмазными и абразивными единичными зернами. Экспериментально было установлено, что при микрорезании алмазными и абразивными остриями применение масел с добавлением четыреххлористого углерода не приводит к снижению сил резания при отсутствии налипших частиц металла. Эти же масляные среды значительно снижают силы трения при резании резцами. В условиях налипания металлических частиц на зерна силы при микрорезании существенно снижаются, что обусловлено образованием химических пленок за

счет применения присадок СОЖ в условиях активного взаимодействия алмаза или абразива с металлом.

Зависимость сил резания от режимов шлифования определяется, прежде всего, характером изменения сечения единичных срезов. Увеличение сечения единичных срезов при неизменном количестве работающих алмазных зерен приводит к росту сил резания. Этим объясняется увеличение

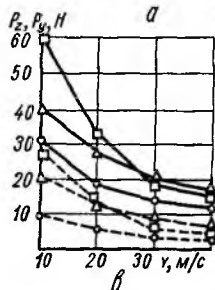
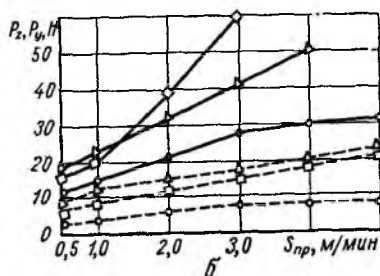
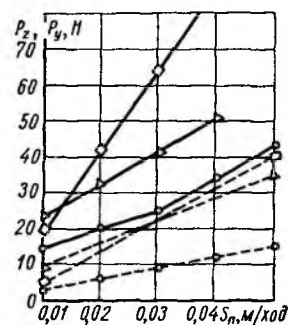


Рис. 37. Зависимость сил резания P_z (штриховая линия) и P_y (сплошная линия) от подачи скорости резания при шлифовании сплавов кругом АСО 100/80—100% — Б1:

а — $v_{кр} = 30$ м/с, $S_{пр} = 1,0$ м/мин; б — $v_{кр} = 30$ м/с, $S_{п} = 0,01$ мм/ход; в — $S_{пр} = 1,0$ м/мин, $S_{п} = 0,01$ мм/ход; Δ — Δ — ТЗКЧ, $\square$ — $\square$ — ЦК-332 $\circ$ — $\circ$ — ВКЧ.

сил резания с ростом поперечной и продольной подач и уменьшением последних с ростом скорости резания (рис. 37). Физические явления, сопровождающие процесс шлифования, вносят существенные коррективы в эти закономерности.

Из графиков (рис. 36, 37, а и б) зависимости сил резания от продольной и поперечной подач видно, что интенсивность изменения сил существенно зависит от вида связки. Так, при работе кругами на прочных связках (М1, К5) изменение подачи S_p более интенсивно влияет на изменение сил, чем у кругов на менее прочных связках — органической и керамической (Б1, К1). При работе абразивными кругами влияние поперечной подачи на силы резания также невелико.

Контакт со связкой и его влияние на силы резания в большей мере усиливается с ростом поперечной подачи и в меньшей — при увеличении продольной подачи. В связи с этим степень влияния поперечной подачи на силы резания оказывается большей, чем продольной (рис. 37, а и б). С увеличением скорости шлифования (при постоянной минутной продольной подаче) уменьшается сечение единичных срезов, снижается контакт связки с обрабатываемым материалом и усилие проникновения алмазных зерен в размягченный поверхностный слой. Совместное действие этих факторов приводит к снижению сил резания при увеличении скорости шлифования (рис. 37, в).

Наряду с указанными факторами снижение силы шлифования при увеличении скорости резания обусловлено уменьшением влияния деформационного упрочнения и адгезионной силы трения. С увеличением скорости резания в результате разупрочняющего действия температуры наблюдается снижение эффекта упрочнения металла.

Снижение силы резания с увеличением скорости шлифования также способствует уменьшению степени влияния адгезионной составляющей силы трения, влияние которой особенно существенно при налипании на поверхность круга металлических частиц.

Физико-механические свойства обрабатываемого металла оказывают существенное влияние на силы резания (рис. 38). При обработке сплавов группы ВК силы резания увеличиваются с ростом содержания в них кобальта. Увеличение кобальта от 2 до 8% приводит к росту сил резания примерно в 1,5 раза. Для сплавов группы ТК на изменение сил резания, помимо кобальта, существенное влияние

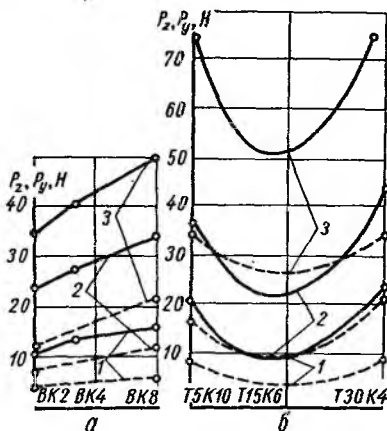


Рис. 38. Изменение сил резания P_z и P_y при шлифовании твердых сплавов марок ВК (а) и ТК (б) кругом АСО 100/80—100% — Б1 ($v_{кр} = 30$ м/с, $S_{пр} = 1,0$ м/мин):

1 — $S_{п} = 0,01$ мм/ход; 2 — $S_{п} = 0,03$ мм/ход; 3 — $S_{п} = 0,05$ мм/ход;

—— — P_z ; - - - - P_y .

оказывает содержание карбида титана TiC . В связи с этим более высокие силы резания возникают при обработке сплава Т5К10, имеющего большее содержание Со, и сплава Т30К4 с высоким содержанием TiC . А при обработке сплава Т15К6 силы резания оказываются наименьшими. Приведенное влияние содержания в твердых сплавах Со и TiC на силы резания, по-видимому, объясняется активностью этих компонентов по отношению в алмазу.

Поэтому нельзя считать исчерпывающим утверждение некоторых исследователей о том, что меньшие силы резания возникают при обработке хрупких сплавов вследствие их более легкого разрушения. Это справедливо для сплавов группы ВК и не подтверждается при обработке сплавов группы ТК с высоким содержанием TiC , а также весьма хрупкой минералокерамики ЦМ-332. Как показали исследования, при определенных условиях шлифования минералокерамики ЦМ-332 возникают более высокие силы резания, чем при обработке сплава Т30К4. Такая закономерность наблюдается при увеличенных значениях продольной и поперечной подач, а также при пониженных скоростях резания (рис. 37). Более высокие силы резания при жестких режимах шлифования минералокерамики, по-видимому, объясняются ее большей твердостью и меньшим снижением твердости при температурах, возникающих в поверхностном слое. Вследствие этого алмазные зерна труднее внедряются в обрабатываемый материал, и для образования среза требуются большие усилия.

Сравнительные опыты по обработке стали Р18 кругами из эльбора показали, что в этом случае возникают такие же силы резания, как при алмазном шлифовании твердых сплавов (рис. 37, 39). По-видимому, это объясняется меньшим взаимодействием эльбора и стали.

Следует отметить, что при ужесточении режимов шлифования увеличивается разрыв в значении сил резания при алмазной и эльборовой обработке, что связано с возникновением адгезионных явлений.

Силы резания при алмазном шлифовании быстрорежущей стали Р18 в 3—5 раз больше, чем при обработке твердых сплавов вследствие интенсивного взаимодействия алмаза со сталью. Силы резания при алмазном шлифовании твердого сплава ВК6 со скоростью 15—20 м/с примерно такие же, как при аналогичных условиях обработки стали 45. При скорости шлифования 30—40 м/с силы резания при

шлифовании стали 45 меньше [81]. В несколько раз выше силы резания при алмазном шлифовании быстрорежущей стали в сравнении с малоуглеродистыми и штамповыми сталями [69]. Входящие в большинство быстрорежущих

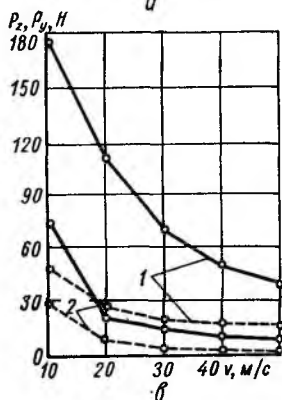
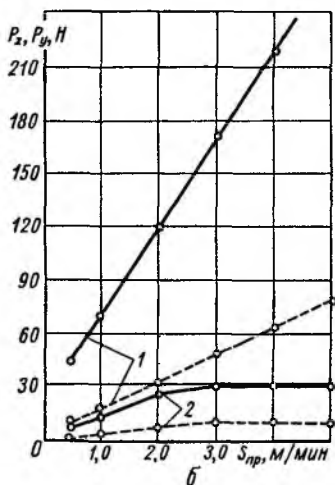
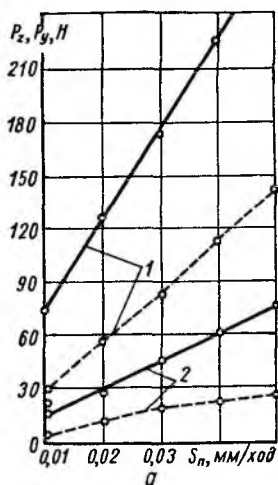


Рис. 39. Зависимость сил резания P_z (штриховая линия) и P_y (сплошная линия) от поперечной (а), продольной (б) подач и скорости резания (в) при шлифовании быстрорежущей стали Р18 кругами 100%-ной концентрации на связке Б1 зернистостью АСО 100/80 (1) и БР 100/80 (2):

а — $v_{кр} = 30$ м/с, $S_{пр} = 1,0$ мм/мин;
б — $v_{кр} = 30$ м/с, $S_{п} = 0,01$ мм/ход;
в — $S_{пр} = 1,0$ мм/мин, $S_{п} = 0,01$ мм/ход.

сталей легирующие элементы W, Mo и V теоретически могут поглощать больше углерода для образования карбидов, чем его содержится в стали. В связи с высоким содержанием карбидообразующих элементов в быстрорежущей стали процесс диффузии при шлифовании интенсифицируется. Последнее может способствовать возникновению адгезионных явлений и увеличению адгезионной составляющей силы трения.

Результатами многочисленных исследований установлено, что при шлифовании соотношение тангенциальной P_z и нормальной P_y составляющих силы резания, названное коэффициентом шлифования, значительно меньше единицы и в зависимости от условий обработки может приближаться к значению коэффициента трения пары шлифовальный круг — обрабатываемый материал.

Таблица 10

Значения коэффициентов шлифования

Обрабатываемый материал	Характеристика круга	Скорость резания, м/с				
		10	20	30	40	50
ВК4	АСО100/80—25%—Б1	—	—	0,55	—	—
ВК4	АСО100/80—100%—Б1	0,38	0,33	0,26	0,21	—
ВК4	АСО160/125—100%—Б1	—	—	0,43	—	—
ВК4	АСВ100/80—100%—М1	—	—	0,42	—	—
ВК8	АСО100/80—100%—Б1	—	—	0,31	—	—
Р18	АСО100/80—100%—Б1	—	0,25	0,29	0,36	0,45
Р18	КР100/80—100%—Б1	—	0,46	0,2	0,19	0,18

Примечание. Условия шлифования: $S_{пр} = 1,0$ м/мин; $S_{п} = 0,01$ мм/ход.

При резании стали ШХ15 алмазным зерном с глубиной до 10—12 мкм отношение P_z/P_y изменяется от 0,27 в режиме, близком к трению, до 0,70 в режиме резания [57]. При микрорезании чугунов с различной твердостью с такой же глубиной отношение P_z/P_y не превышает 0,5. При этом для случая образования канавок алмазным конусом вследствие выдавливания значение коэффициента шлифования тем выше, чем мягче материал, на котором наносится риска. С переходом от выдавливания к резанию значение коэффициента увеличивается с ростом глубины микрорезания наиболее интенсивно, что наблюдалось при микрорезании закаленного чугуна твердостью HRC 52—55. Для оценки доли энергетических затрат на полезную работу срезания микростружки используется обратная величина P_y/P_z [69]. При микрорезании меди алмазными остриями $\rho = 13 \dots 200$ мкм значение P_y/P_z уменьшается от 5 до 1,7 с увеличением отношения $h_e = h/\rho$ (h — глубина микрорезания) примерно от 0,05 до 0,75. В этом случае максимальное значение отношения P_z/P_y не превышает 0,6.

Процесс срезания микростружек микровыступами на поверхности зерен начинается уже при $h_e = 0,04 \dots 0,08$.

Таким образом, коэффициент шлифования может характеризовать эффективность работы алмазного круга (чем больше он отличается от коэффициента трения, тем эффективнее режет круг).

Из данных табл. 10 видно, что увеличение скорости резания при обработке твердых сплавов снижает коэффици-

Таблица 11

Значения коэффициентов шлифования

$S_{\text{ш}}$, мм/ход	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05
Коэффициент шлифования $K_{\text{ш}} = P_z/P_y$	0,41	0,5	0,53	0,56	0,57

Примечание. Условия шлифования: $V_{\text{кр}} = 30$ м/с, $S_{\text{пр}} = 1,0$ м/мин, круг АСО 100/80 — 100% — Б1, материал Т30К4.

ент шлифования. В данном случае уменьшение сечения среза приводит к росту числа зерен, проскальзывающих без снятия стружки, т. е. увеличивается доля обычного процесса скольжения. Аналогичным образом влияет на коэффициент шлифования увеличение концентрации алмазов в круге.

При алмазной обработке быстрорежущей стали Р18 увеличение скорости шлифования приводит к повышению коэффициента шлифования, что вызвано интенсификацией адгезионных явлений. При тех же условиях шлифования быстрорежущей стали кругом КНБ коэффициент шлифования снижается.

На коэффициент шлифования существенное влияние оказывает связка круга. Например, при работе кругом на металлической связке, даже с применением СОЖ, коэффициент шлифования значительно выше, чем при шлифовании кругом аналогичной характеристики на бакелитовой связке.

Увеличение коэффициента шлифования с ростом поперечной подачи можно рассматривать как следствие более благоприятного соотношения толщины единичного среза и радиуса вершины алмазного зерна, благодаря чему сила P_z возрастает более интенсивно, чем сила P_y (табл. 11).

ИСТОЧНИКИ ТЕПЛА И ТЕМПЕРАТУРА АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ

В качестве источников тепла при шлифовании обычно рассматривают работу деформирования металла и работу внешнего трения абразивных зерен по поверхности обработки. Согласно схеме (рис. 40, а) зона теплообразования находится в плоскости сдвига стружки АС. Эта схема не учи-

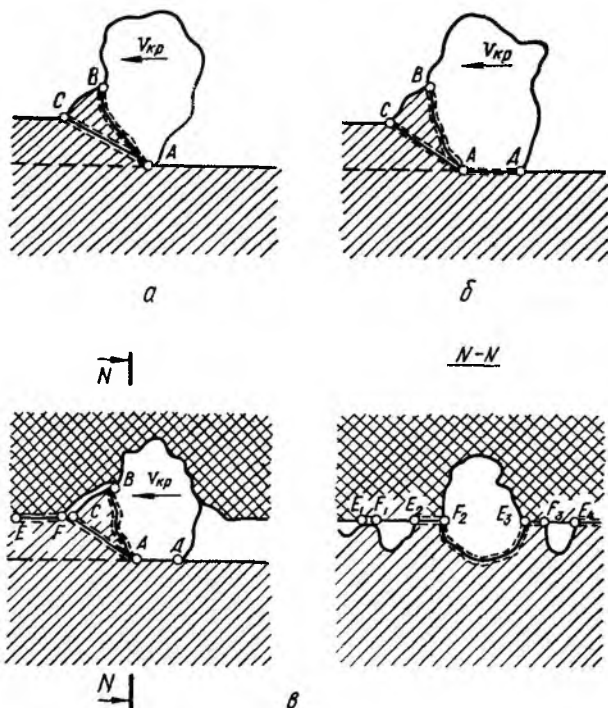


Рис. 40. Зоны теплообразования при шлифовании.

тывает все источники тепла и не может быть признана удовлетворительной.

Схема, показанная на рис. 40, б, является более удачной, так как здесь в качестве источников теплообразования рассматриваются поверхность трения стружки по зерну, трение зерна по обработанной поверхности и поверхность сдвига при образовании стружки (зоны АВ, АД, АС). В соответствии с приведенными схемами при расчетах в качест-

ве мгновенных источников тепла принимаются перемещающиеся с огромной скоростью абразивные зерна или шлифовальный круг в целом; в ряде случаев принимается площадь мгновенного контакта круга с изделием, определяемая как суммарная площадь отпечатков отдельных абразивных зерен.

Особые свойства алмаза как абразивного материала резко снижают мощность, необходимую для шлифования,

Таблица 12

Контактная температура при резании-царапании стали ШХ15 [57]

Твердость	Зерно	Глубина резания, мкм							
		1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	7,5	10	15
$H_{\nu}210$	Алмаз	200	300	500	650	800	1150	1250	1350
$H_{\nu}725$	Алмаз	300	700	1000	1200	1300	1380	1400	—
$H_{\nu}725$	Карбид кремния	700	1200	1350	1400	—	—	—	—

уменьшают количество выделяющегося тепла и температуру. При оптимальных условиях шлифования ее среднее значение значительно ниже, чем при шлифовании абразивными кругами.

В то же время результаты экспериментальных исследований указывают на возможность мгновенных высокотемпературных вспышек на единичных режущих зернах алмаза (табл. 12). При микрорезании закаленной стали ШХ15 алмазным конусом с углом заострения 120° и радиусом $\rho = 10$ мкм точка плавления стали достигается при скорости 15—20 м/с. Для сырой стали рост температуры с увеличением глубины резания происходит быстрее, особенно при микрорезании зерном из карбида кремния. Однако мощность теплообразования при алмазном шлифовании определяется не только свойствами алмаза, но и свойствами всего алмазоносного слоя.

Известно, что состав и структура алмазоносного слоя отличаются от структуры и состава абразивного круга.

В зоне контакта связи с деталью (рис. 40, в участки EF , E_1F_1 , E_2F_2 , E_3F_3) возникает сила трения, величина которой будет зависеть от ряда факторов, в том числе от материала связи, ее наполнителя и характера взаимодействия

их с обрабатываемым материалом. В результате появляется новый источник тепла, который непосредственно не связан с работой резания. О его мощности можно судить по результатам измерения температуры при шлифовании кругами на связках Б1, Б2, Б3. Для кругов на связке Б2 значение температуры оказалось на 100—200°С выше, чем для остальных. Эта разница увеличивается по мере увеличения поперечной подачи, в то же время она чрезвычайно мала при $S_n = 0,005$ мм/дв. ход. Если влияние связки столь ощутимо сказывается на уровне контактной температуры, средней по ширине алмазоносного слоя круга, то оно еще в большей степени сказывается на мгновенной температуре, развивающейся в зоне шлифования. Следовательно, поверхность контакта связки круга с деталью необходимо рассматривать как зону весьма мощного теплообразования, пренебрежение которым в аналитических методах расчета температуры может привести к серьезным ошибкам.

Если же связка еще не контактирует с деталью, но выступание зерен уже незначительно, то на этих участках развивается температура от трения стружки о связку.

Очевидно, что зоны теплообразования, характеризующие непосредственно работу алмазного зерна, в общем случае будут теми же, что и для абразивного зерна (АВ, АС, АД). Но при этом необходимо учитывать, что износ алмазного зерна может происходить как путем истирания с образованием площадок, так и путем микровыкрашиваний. В последнем случае зона тепловыделения АД может отсутствовать, так как кромки алмазного зерна будут сохранять остроту в процессе всего периода его работы.

Следовательно, зоны тепловыделения у работающего зерна необходимо рассматривать с учетом износа алмазных зерен, определяемого условиями шлифования, маркой обрабатываемого материала и т. д.

Для процесса алмазного шлифования представляется более правильной схема теплообразования, приведенная на рис. 40, в. В отличие от ранее приведенных схем, она учитывает зону теплообразования, связанную с наличием контакта связки круга с обрабатываемой поверхностью. Площадь указанного контакта не является постоянной в течение процесса шлифования и зависит от величины поперечной и продольной подач, скорости шлифования, состояния режущего профиля рабочей поверхности алмаз-

ного круга. Теплофизические свойства алмазов и связки как элементов, непосредственно находящихся в зонах выделения тепла, играют важную роль в его распределении. Высокая теплопроводность алмазов позволяет рассматривать их как мощные каналы отвода тепла из зоны резания. Показательно, что увеличение концентрации алмазов от 50 до 100% в органической связке повышает площадь контакта с алмазами в 10 раз [75] и теплопроводность алмазонасного слоя в 1,5—2 раза. Возрастает теплопроводность

Таблица 13

Теплофизические свойства алмазных кругов

Характеристика круга	Удельная теплоемкость C , Дж/кг · К	Теплопроводность λ , Вт/м · К	Температуропроводность α , м ² /с
АСР125/100—50% — Б1	882,0	2,1	$0,012 \cdot 10^{-4}$
АСР125/100—50% — К1	672,0	1,77	$0,008 \cdot 10^{-4}$
АСР125/100—50% — М1	428,4	5,6	$0,015 \cdot 10^{-4}$

алмазонасного слоя при металлизации алмазов. Для примера в табл. 13 приведены данные о теплофизических свойствах кругов.

Доля тепла, уходящего в круг, составляет для керамической связки 12,8%, органической 15,2 и металлической 50%. Соответственно снижается количество тепла, уходящего в изделие.

Обработка инструментальных материалов (быстрорежущих сталей, твердых сплавов, минералокерамики) обычно сопровождается выделением в зоне шлифования большого количества тепла. Температурный режим заточки и доводки является одним из важнейших факторов, определяющих качество инструмента и его работоспособность.

Рассмотрим результаты экспериментального измерения температуры алмазного шлифования быстрорежущей стали, твердых сплавов, минералокерамики и алмазных поликристаллов.

Обработка велась на универсально-заточном станке 3Б642 по жесткой схеме шлифования чашечными кругами на органических связках Б1, Б2, Б3 с концентрацией алмазов в алмазонасном слое 50, 100, 150 и 200% с зернистостью от АСО 50/40 до АСО 200/160. При выборе размера площади контакта круга с деталью было установлено, что она

существенно влияет на величину фиксируемой температуры. Как видно из табл. 14, при изменении высоты образца и площади контакта в пределах 40—60 мм² температура изменяется незначительно, но уже при переходе от 80 до 100 мм² изменение ее составляет 100—300° С. Оно оказа-

Таблица 14

Влияние площади контакта круга с деталью на температуру при шлифовании

Обрабатываемый материал	Площадь контакта, мм ²	Температура, °С, при поперечных подачах, мм/дв. ход		
		0,005	0,01	0,02
Р18	40	210	295	420
	60	290	355	550
	80	393	500	695
	100	575	670	980
ВК6М	40	195	245	340
	60	205	275	407
	80	250	340	475
	100	350	450	660
ЦМ-332	40	140	175	240
	60	165	235	300
	80	220	315	445
	100	280	415	695

лось значительнее для больших поперечных подач (остальные условия: АСО 50/40 — 50% — Б1, $S_{пр} = 1$ м/мин, $V_{кр} = 19$ м/с).

В условиях шлифования торцом чашечного круга длина пути алмазного зерна в обрабатываемом материале определяет длину стружки, размещение которой затруднено. Резко возрастает работа трения, интенсифицируются адгезионные явления. При равных площадях контакта температура выше там, где путь алмазного зерна в обрабатываемом материале больше. Эти данные в определенной степени объясняют несопоставимость результатов измерения температуры, приводимых в работах различных исследователей. В опи-

санных экспериментах площадь контакта круга с деталью была постоянной и равной 100 мм².

Температура в зоне резания зависит от всех параметров режима шлифования. При жесткой схеме шлифования величина поперечной подачи определяет производительность процесса, так как от нее, главным образом, зависит толщина слоя обрабатываемого материала, снимаемого за один двойной ход. Тем самым определяется работа шлифования и количество выделяющегося при этом тепла. Поэтому увеличение поперечной подачи вызывает рост температуры шлифования (рис. 41, а). Следует учитывать, что повышение температуры несколько сдерживается тем, что с увеличением поперечной подачи возрастает площадь контакта де-

тали с алмазными зернами, являющимися одновременно теплоотводящими каналами. С другой стороны, при больших поперечных подачах контакт связки круга с деталью становится значительнее, что приводит к выделению дополнительного количества тепла, не связанного непосредственно с работой резания.

Графически зависимость между температурой и поперечной подачей в исследуемых интервалах выражается линией,

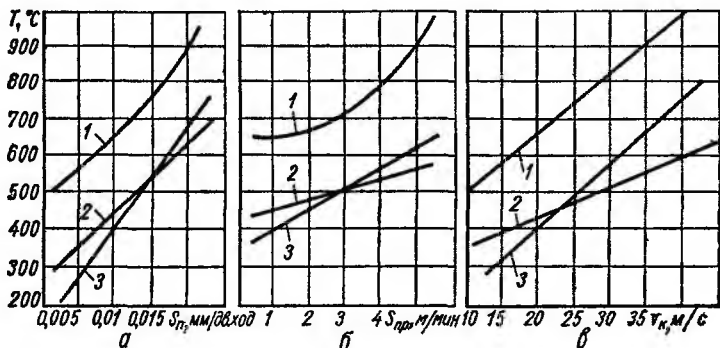


Рис. 41. Зависимость температуры от поперечной (а), продольной (б) подачи и скорости резания (в) при шлифовании сплавов Р18 (1), ВК6М (2) и минералокерамики ЦМ-332 (3) кругом АСО 50/40—50% — Б1:

а — $v_{\text{кр}} = 19 \text{ м/с}$, $S_{\text{пр}} = 1,0 \text{ мм/мин}$; б — $v = 19 \text{ м/с}$, $S_{\text{пр}} = 0,01 \text{ мм/ход}$;
в — $S_{\text{пр}} = 0,01 \text{ мм/ход}$; $S_{\text{пр}} = 1,0 \text{ мм/мин}$.

близкой по форме к прямой. Наибольшие значения температуры получены для стали Р18: она на $200\text{—}300^\circ\text{C}$ выше, чем для твердого сплава и минералокерамики. Большее превышение установлено для кругов 50%-ной концентрации. По мере уменьшения концентрации алмазов в круге угол наклона прямых увеличивается, что указывает на более интенсивный рост температуры.

Изменение продольной подачи от 1 до 5 м/мин также вызывает увеличение температуры. Оно оказалось наибольшим для стали Р18 и наименьшим — для твердого сплава ВК6М. Увеличивая продольную подачу, можно уменьшить время контакта круга с деталью, сохраняя толщину слоя, подлежащего снятию за двойной ход. Время контакта точки на обрабатываемой поверхности с кругом, ширина кольца которого 10 мм, при $S_{\text{пр}} = 0,5 \text{ м/мин}$ составит 0,02 мин, а при $S_{\text{пр}} = 5 \text{ м/мин}$ — в десять раз меньше. При оборотах

шпинделя $n = 3000$ об/мин каждое режущее зерно встречается с обрабатываемым материалом в первом случае 60 раз, а во втором — только 6. Поэтому каждое режущее зерно будет испытывать большие нагрузки, а в зоне его работы температура будет увеличиваться. Приведенные графические зависимости между температурой и продольной подачей (рис. 41, б) представляют собой прямые линии и лишь для стали Р18 при $S_n = 0,01$ мм/дв. ход зависимость будет криволинейной. Это относится к диапазону температур, превышающих 700°C . Такое повышение температуры приводит к возникновению схватывания алмаза со сталью, что, в свою очередь, вызывает более интенсивный рост температуры. Подтверждением этому является график зависимости температуры от продольной подачи при шлифовании стали Р18 с $S_n = 0,005$ мм/дв. ход, когда схватывание не имеет места. На рис. 41, в приведены зависимости температуры от скорости шлифовального круга. При увеличении скорости от 13 до 40 м/с температура изменяется для стали Р18 от 500 до 950°C , для сплава ВК6М — от 370 до 600°C , для минералокерамики — от 250 до 445°C .

Полученные результаты показывают, что интенсификация процесса шлифования алмазными кругами на органической связке за счет повышения режимов резания связана со значительным повышением температуры. При низкой скорости, малых поперечной и продольной подачах температурный режим способствует проявлению высоких режущих свойств алмаза и формированию качественного поверхностного слоя. С повышением параметров, интенсифицирующих съем, условия снимаемости стружки ухудшаются, возрастает работа трения и деформации, что отрицательно сказывается на результатах обработки.

Немалую роль играет правильный с точки зрения температурного режима выбор характеристики алмазного круга — концентрации, зернистости и связки. Для кругов с высоким содержанием алмазов (рис. 42, а) температура шлифования твердого сплава ВК6М и минералокерамики ЦМ-332 составляет $200\text{—}350^\circ\text{C}$, а с уменьшением концентрации до 50% резко возрастает и составляет $400\text{—}700^\circ\text{C}$. Для стали Р18 это различие еще большее. Такое влияние концентрации алмазов на температуру связано с действием двух групп факторов, влияющих на количество выделяемого и отводимого из зоны резания тепла. С повышением концентрации увеличивается число алмазных зерен на ра-

бочей поверхности кругов. Протяженность суммарной режущей кромки возрастает, резание облегчается, тепловыделение снижается. Трение обрабатываемого материала по связке в определенной степени заменяется трением по алмазу, что также уменьшает количество выделяющегося тепла. Увеличение поверхности контакта алмаза с обрабатываемым материалом интенсифицирует теплоотвод. Все это

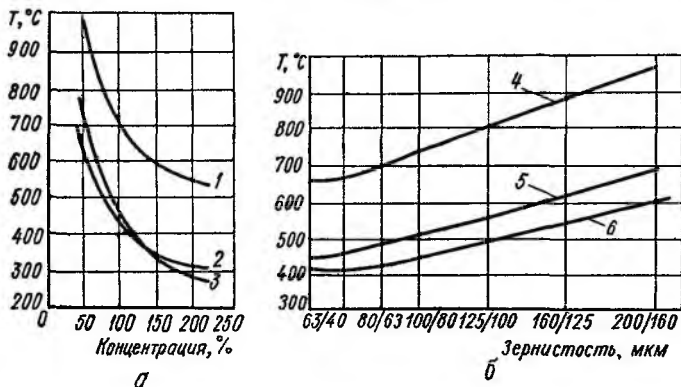


Рис. 42. Зависимость температуры от концентрации алмазов в кругах АСО 50/40 — Б1 (а) и зернистости алмазов в кругах АСО 50% — Б1 (б) при шлифовании быстрорежущей стали Р18 (1, 4) твердого сплава ВК6М (2, 5) и минералокерамики ЦМ 332 (3, 6); $v_{кр} = 19$ м/с, $S_n = 0,02$ мм/дв. ход.

вместе способствует снижению температуры шлифования с повышением концентрации алмазов в круге.

Влияние зернистости на температуру (рис. 42, б) связано с тем, что зерна различных размеров имеют неодинаковую остроту режущих кромок, а число их в единице объема алмазонасного слоя круга непосредственно зависит от крупности зерна. Чем выше зернистость, тем меньше зерен на рабочей поверхности алмазного круга. Меньшему числу зерен с более округлыми кромками труднее снимать припуск, определенный поперечной подачей. Количество выделяющегося тепла при этом увеличивается. Этому способствует также увеличение площадок контакта связки круга с деталью. При этом отвод тепла через алмазные зерна уменьшается. Поэтому повышение размеров зерен в круге приводит к увеличению температуры. Имеющийся на графиках перегиб для зернистости АСО 50/40 связан с тем, что мелкие

зерна имеют малый вылет, и трение связки вызывает повышение температуры.

Характер полученных зависимостей температуры от режимов шлифования и характеристики кругов для быстрорежущей стали, твердого сплава и минералокерамики оказался одинаковым. Наиболее высокие значения температуры

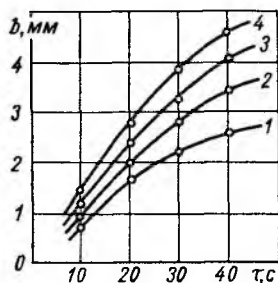


Рис. 43. Влияние продолжительности шлифования τ на расстояние изотерм от поверхности, обработанной алмазными кругами 100%-ной концентрации:

1 — АСВ 100/80 — Б1; 2 — АСР 100/80 — Б156; 3 — АСО 100/80 — Б1; 4 — АСО 100/80 — Б156.

получены для быстрорежущей стали Р18. Это объясняется тем, что она наиболее вязкая из исследуемых материалов и имеет наибольший предел прочности на изгиб. Снимаемая стружка и тонкий поверхностный слой претерпевают пластические деформации. Коэффициент трения алмаза по стали выше, чем по минералокерамике и твердым сплавам. Поэтому и уровень температуры при шлифовании стали выше, чем при шлифовании твердых сплавов и минералокерамики. При обработке сплава ВК6М и минералокерамики ЦМ-332 температуры отличаются незначительно. Возможно, что в действительности температура при шлифовании минералокерамики несколько выше, так как имеет место некоторое занижение результатов, которое дает искусственная термопара.

Для сравнения температурного режима шлифования кругами с алмазами различной прочности АСО, АСР и АСВ успешно применен метод изотерм. Он основан на способности тонких пленок чистых металлов, получаемых на шлифуемых образцах конденсацией в вакууме, чрезвычайно быстро (за время $\tau = 1 (10^{-6} \dots 10^{-7} \text{ с})$) оплаиваться в зоне, температура которой достигает или превышает точку плавления. Граница, разделяющая исходную и оплавленную зоны пленки, представляет собой изотерму, т. е. совокупность точек, температура которых соответствует точке плавления данного металла.

Результаты исследований представлены на рис. 43 в виде кривых перемещения изотермы в зависимости от продолжительности шлифования. Одинаковой продолжительности работы кругов соответствует наибольшее удаление изотерм

получены для быстрорежущей стали Р18. Это объясняется тем, что она наиболее вязкая из исследуемых материалов и имеет наибольший предел прочности на изгиб. Снимаемая стружка и тонкий поверхностный слой претерпевают пластические деформации. Коэффициент трения алмаза по стали выше, чем по минералокерамике и твердым сплавам. Поэтому и уровень температуры при шлифовании стали выше, чем при шлифовании твердых сплавов и минералокерамики. При обработке сплава ВК6М и минералокерамики ЦМ-332 температуры отличаются незначительно. Возможно, что в действительности температура при шлифовании минералокерамики несколько выше, так как имеет место

для кругов с алмазами марки АСО, а затем удаление изотерм уменьшается для кругов с алмазами марок АСР и АСВ. Такое расположение изотерм свидетельствует о том, что при шлифовании кругами с алмазами марок АСВ в обрабатываемую деталь поступает наименьшее количество тепла. Это явление необходимо рассматривать с точки зрения двух групп факторов, влияющих на теплообразование и отвод тепла. Более низкая прочность алмазных зерен марки АСО приводит к тому, что из-за дробимости в процессе изготовления и эксплуатации высота части зерен, выступающей над связкой, оказывается меньше, чем у более прочных алмазов марки АСР и АСВ. Это ухудшает вмещаемость стружки между рабочей поверхностью круга и обрабатываемой, увеличивает трение связки круга о деталь, что способствует повышению теплообразования. С этой точки зрения для кругов с алмазами марки АСВ характерна наименьшая мощность теплового источника в зоне резания. В то же время характер распределения и обновления режущих кромок для резания наиболее благоприятный у зерен марки АСО, наименее — у зерен марки АСВ. Величина площади контакта алмаза с обрабатываемым материалом и стружкой оказывает существенное влияние на количество тепла, отводимого непосредственно в алмазные зерна из-за высокой теплопроводности алмаза. Хотя алмазы марки АСВ, истираясь, приобретают площадки износа, в общем их форма более округлая, чем у зерен марок АСО и АСР. Поэтому площадь контакта работающих алмазных зерен марки АСВ, по-видимому, больше, чем у зерен марок АСО и АСР. Следовательно, и отвод тепла этими зернами из зоны резания больше. Результатом суммарного действия рассмотренных факторов является снижение температуры резания, уменьшение количества тепла, поступающего в образец при шлифовании кругами с алмазами марки АСВ.

Различные температуры возникают и при шлифовании синтетических поликристаллов марок АСБ и АСПК кругами из алмазов АСР, АСВ и АСК. В последнем случае они наиболее высокие. В общем алмазное шлифование синтетических поликристаллов марок АСБ и АСПК сопровождается сравнительно невысокой температурой, которая в зависимости от условий обработки находится в пределах 100—400° С. С повышением скорости круга, нормального давления (поперечной подачи) и зернистости температура шлифования увеличивается.

Таким образом, процесс алмазного шлифования инструментальных материалов может характеризоваться различным температурным режимом в зависимости от выбранных условий (табл. 15). Применение кругов средней зернистости с концентрацией алмазов 100—200%, а также назначение умеренных режимов шлифования создает низкотемпе-

Результаты экспериментального измерения

Характеристика круга	Обрабатываемый материал	Режимы	
		$V_{кр}$ м/сек	$V_{изд}$ м/мин
АСО 200/160 — 50% — Б1	ВК8	26	—
АСВ 125/100 — 50% — М1	22ХС	28,5	10
АСР 125/100 — 50% — М1	Керамика	28,5	10
АСР 125/100 — 50% — Б1		28,5	10
АСР 100/80 — 100% — М5		19—43	—
	Т15К6	31	—
		31	—
АСО 80/63 — 100% — Б1	ШХ15	35	4—17
АСО 100/80 — 150% — ТО2	ШХ15	»	4—17
АСО 80/63 — 100% — Б1	Т15К6	24,5	—
Алмазный круг на связке Б1	Т15К6	33	—
АСО 50/40 — 50% — Б1	Р18	19	—

ратурные условия обработки, когда температурный фактор не оказывает отрицательного влияния на качество поверхностного слоя затачиваемого инструмента. При неблагоприятном сочетании режимов шлифования, характеристики кругов и площади контакта детали с кругом в зоне резания возникает высокая температура. Установленные зависимости температуры от действия различных факторов дают возможность более правильно выбрать оптимальные условия, обеспечивающие высокое качество алмазной обработки режущего инструмента.

РОЛЬ ТЕПЛОВЫХ ЯВЛЕНИЙ

Процесс шлифования абразивными кругами характеризуется высокими температурами резания. Первые измерения температуры алмазного шлифования свидетельствовали о существенно более низком ее уровне в сравнении с аб-

разивным. При обработке твердого сплава эта разница составила 700—800° С.

Как видно из табл. 16, численные значения температуры весьма различны и колеблются в пределах 100—985° С. Большие значения температуры характерны для алмазной обработки закаленных сталей. Повышение режимов шлифо-

Таблица 15

температуры алмазного шлифования

шлифования			Т° С	Литературный источник
$S_{пр}$ м/мин	$S_{п.}$ мм/дв.ход	t , мм		
2,5	0,01—0,3	—	220—700	[53]
—	—	0,05	200	[48]
—	—	0,05	135	[48]
—	—	0,05	165	[48]
1,5	—	0,02	100—740	[75]
0,5—3,5	—	0,02	150—600	[75]
1,5	—	0,01—0,06	180—660	[75]
—	—	0,005	440—780	[5,47]
—	—	0,005—0,01	360—700	[5,47]
0,5—1	—	—	420—600	[13]
1,5	—	0,007—0,03	135—600	[52]
1	0,005	—	555—985	
	0,020			

вания приводит к тому, что при сохранении указанного различия уровень температуры и ее роль при определенных условиях могут быть весьма значительными. Температурный режим алмазного шлифования может оказывать заметное влияние на физико-химическую активность алмаза, взаимодействие круга и материала обрабатываемой детали, износ алмазов и качество поверхностного слоя. Влияние температуры на физико-химическое взаимодействие алмазного круга со сталью подтверждается приведенными данными в табл. 16.

Как видно из табл. 16, температурные интервалы, связанные с интервалами поперечных подач, неодинаковые для кругов с различной концентрацией алмазов. Наиболее низкие температуры и наименьший интервал их изменений характерны для круга 200%-ной концентрации. Контролируемые характеристики стали близки к исходным, и признаков интенсивного физико-химического взаимодействия

Влияние условий алмазного шлифования на температуру и состояние поверхностного слоя

Характеристика круга	Режим шлифования			$T, ^\circ\text{C}$	Наличие схватывания	Количество остаточного аустенита, %	Относительное количество карбидов	Шероховатость R_a , мкм
	$V_{\text{кр}}, \text{м/с}$	$S_{\text{пр}}, \text{м/мин}$	$S_{\text{п}}, \text{мм/дв ход}$					
АСО 50/40 — 50% — Б1	19	1	0,005	555	Нет	10	0,21	0,10
			0,010	660	На отдельных участках	23	0,23	0,11
			0,020	985	Интенсивное	25	0,27	0,16
АСО 50/40 — 100% — Б1	19	1	0,005	390	Нет	—	—	0,13
			0,010	475	Нет	15	0,22	0,14
			0,020	695	На отдельных участках	—	—	0,16
АСО 50/40 — 200% — Б1	19	1	0,005	330	Нет	5	0,20	0,11
			0,010	385	Нет	5	0,21	0,12
			0,020	460	Нет	6	0,22	0,13

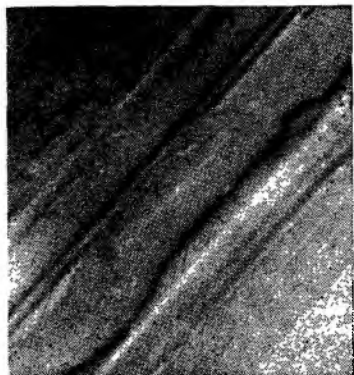
Примечание. Исходное состояние: количество остаточного аустенита — 5%, относительное количество карбидов — 0,2.

алмазного круга со сталью не обнаружено. Иная картина наблюдается при низкой концентрации алмазов в круге. Высокие температуры вызывают изменение состояния поверхностного слоя быстрорежущей стали и повышают его пластичность. Совместная пластическая деформация тончайших поверхностных слоев алмаза и стали, а также контакт вновь образующихся ювенильных поверхностей облегчают диссоциацию кристаллической решетки алмаза и, как следствие, интенсифицируют физико-химическое взаимодействие алмазного круга со сталью.

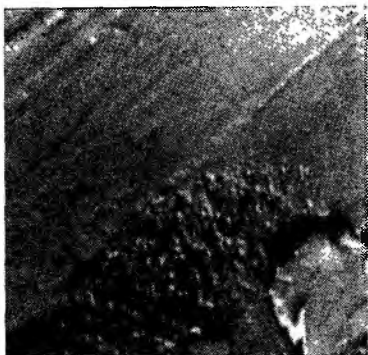
Одним из проявлений этого взаимодействия является адгезия алмаза со сталью, о начале которой свидетельствует повышение мощности шлифования, а в дальнейшем — искрение, интенсивное засаливание рабочей поверхности и, наконец, прекращение резания. Увеличение мощности и

повышение температуры шлифования вызвало затраты энергии на разрушение возникающей связи алмаз — сталь, которое происходит как по стали, так и по алмазу.

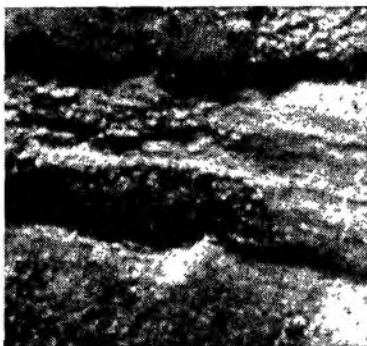
Возникновение мельчайших вырывов отчетливо видно на электронных снимках обработанной поверхности (рис. 44).



а



б



в

Рис. 44. Поверхность стали Р18 после шлифования кругом АСО 63/50—50%—Б1 ($v_{кр} = 19$ м/с), $\times 6000$:

а — $S_{пр} = 1$ м/мин и $S_{п} = 0,005$ мм/дв. хода; б — $S_{п} = 0,01$ мм/дв. ход; в — $S_{п} = 0,02$ мм/дв.ход.

При температуре 660—700°С вырывы наблюдаются в виде отдельных осповидных участков — очагов. С повышением температуры до 985°С вырывы

покрывают всю поверхность. Возникновение адгезии приводит к усилению износа, увеличению шероховатости обработанной поверхности, а в поверхностном слое происходят нежелательные структурные изменения, о чем свидетельствуют данные об изменении количества остаточного аустенита и ширины дифракционной линии мартенсита [73].

Особый интерес представляет изменение относительного содержания карбидов с учетом растворения карбидов в аустените. Для такого изменения необходимо поступление дополнительного количества углерода в поверхностный

слой. Возможные причины этого явления, обусловленного высокой температурой, детально изучены [73].

Результаты спектрального анализа поверхности образцов из стали P18, шлифованной алмазным кругом, подтвердили факт ее науглероживания. В зависимости от условий шлифования содержание углерода повышается до 2,3% при 0,7—0,8% в исходном состоянии. Такое изменение химического состава материала поверхностного слоя является следствием диффузионных процессов, протекающих в нем. Известно, что скорость диффузионного процесса зависит от градиента концентрации фазы, градиента температуры и упругих деформаций [43]. Если поверхность контакта алмазных зерен и стали рассматривать как границу раздела объемов с различной концентрацией углерода, то можно констатировать наличие градиента концентрации углерода. Несмотря на более низкую энергоемкость процесса алмазного шлифования и высокую теплопроводность алмазных зерен, средняя контактная температура может достигать высоких значений, а в слоях, непосредственно прилегающих к поверхности резания, устанавливается значительный градиент температуры. Под действием силового и температурного факторов в поверхностном слое шлифуемой детали происходят пластические и упругие деформации, неравномерные по глубине. Таким образом, в поверхностном слое имеется и градиент упругой деформации.

Можно сделать вывод, что при алмазном шлифовании поверхностный слой формируется в условиях действия трех основных факторов, определяющих наличие градиента химического потенциала: градиентов концентрации, температуры и упругой деформации (напряжений). Эти факторы вызывают диффузионное перераспределение углерода в объеме поверхностного слоя, для описания которого в общем случае можно использовать уравнение Фика [43]

$$\frac{\partial q_m}{\partial \tau} = D_c \frac{\partial C}{\partial x} - D_\tau \frac{\partial \tau}{\partial x} - D_\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial x},$$

где q_m — масса углерода, продиффундировавшего через единицу площади; τ — время действия факторов; D_c — коэффициент диффузии, отражающий интенсивность перемещения атомов углерода из алмазных зерен (органической связки) в сталь вследствие градиента концентрации $\frac{\partial C}{\partial x}$; D_τ — коэффициент диффузии, отражающий интенсивность

диффузии углерода из-за наличия температурного градиента $\frac{\partial T}{\partial x}$; D_ϵ — коэффициент диффузии, отражающий интенсивность перемещения атомов углерода из-за наличия градиента упругой деформации $\frac{\partial \epsilon}{\partial x}$.

Поскольку рассматривается изменение количества углерода в тонком поверхностном слое шлифуемой детали, то первый член правой части уравнения отражает диффузию углерода из алмазных зерен (органической связки) круга в сталь, т. е. диффузионный поток углерода от рабочей поверхности круга в местах контакта с обрабатываемой сталью направлен в сторону ее глубинных слоев. Второе слагаемое описывает восходящий поток атомов углерода, идущего из глубинных слоев металла навстречу потоку тепла, распространяющемуся на зоны контакта алмаз — металл. Третье слагаемое описывает процесс диффузии, обусловленный наличием градиента упругой деформации. В то время как первый член правой части уравнения приводит к выравниванию концентрации, третий, учитывающий неоднородное напряженное состояние, содействует разделению концентраций. Эти потоки вызывают перераспределение углерода в поверхностном слое таким образом, что приповерхностные слои (более нагретые и более напряженные) насыщаются углеродом, а более удаленные обедняются углеродом.

Оценить взаимное влияние встречных потоков на результаты диффузии и перераспределения углерода в поверхностном слое трудно. Все же можно утверждать, что повышение концентрации углерода в приповерхностных слоях уменьшает интенсивность диффузии из алмазных зерен и органической связки круга в сталь. В свою очередь, диффузионный поток атомов углерода из алмаза должен сдерживать процесс насыщения углеродом приповерхностных слоев за счет глубинных. Это значит, что при алмазном шлифовании обезуглероживание глубинных слоев должно быть меньшим, чем при любом абразивном шлифовании при сохранении прочих одинаковых условий.

Вслед за прекращением процесса шлифования перестают действовать два из трех факторов, побуждающих диффузию углерода, — температурный градиент и градиент концентрации, — т. е. прекращается контактирование алмаза со сталью и выравнивание температуры в объеме образца. Однако, такое перераспределение углерода создает градиент

концентрации в поверхностном слое стали, который должен вызывать концентрационную диффузию, направленную в глубинные слои. Если бы этому ничего не препятствовало, то снова произошло бы перераспределение углерода, выравнивающее химический потенциал по сечению образца. Данные спектрального анализа, проведенного спустя несколько суток после прекращения шлифования, показывают, что содержание углерода в тонком поверхностном слое превышает исходное в 1,5—2 раза.

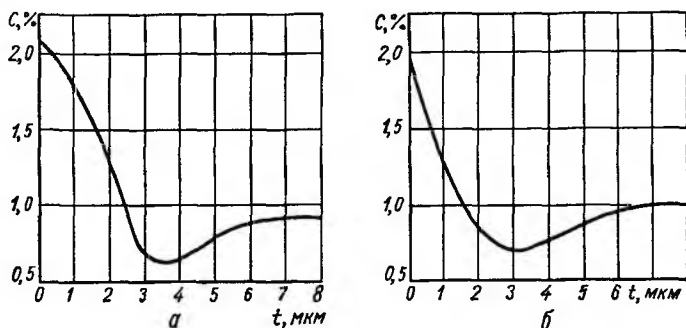


Рис. 45. Перераспределение углерода по глубине поверхностного слоя быстрорежущей стали после шлифования кругом:

а — АСО 50/40 — 200% — Б1 ($v_{кр} = 30$ м/с, $S_{пр} = 1$ м/мин, $S_{п} = 0,04$ мм/дв. ход); б — кругом ЭБ — 40 — М31К ($v_{кр} = 30$ м/с, $S_{пр} = 1$ м/мин, $S_{п} = 0,04$ мм/дв. ход).

По-видимому, основной причиной, препятствующей новому перераспределению углерода с целью выравнивания его концентрации по всему объему, можно считать то, что он находится в связанном состоянии в виде карбидов. Для перемещения атомов углерода необходим распад карбидов, что возможно лишь при высокой температуре. Продолжительность действия температуры определяется временем контакта круга со сталью непосредственно в процессе шлифования. В связи с этим можно предположить, что существование диффузионных потоков углерода и его перераспределение также происходит за этот промежуток времени.

Таким образом, для того, чтобы в некоторых объемах поверхностного слоя шлифуемой стали произошло перераспределение углерода под действием градиента температуры и градиентов напряжений, необходим нагрев этих слоев до температуры не ниже температуры распада карбидов. Для диффузии атомов углерода из алмаза необходим нагрев

контактных поверхностей алмазных зерен до температуры порядка 500—850° С, когда происходит диссоциация кристаллической решетки алмаза и возможен переход атомов углерода в сталь.

На рис. 45 приведена кривая перераспределения углерода по глубине поверхностного слоя стали 170Х6Ф4М после шлифования алмазным кругом, построенная по результатам спектрального анализа. В приповерхностном слое толщиной 3 мкм наблюдается избыточное содержание углерода. Ниже залегает обезуглероженный слой (3—10 мкм), а далее находится слой с исходной концентрацией углерода. Обезуглероженный слой образовался в результате диффузии атомов углерода к поверхности за счет градиента температуры и напряжений. Эти восходящие потоки вместе с потоком из поверхности круга обогащают углеродом приповерхностный слой.

Аналогичное явление установлено экспериментально и в процессе алмазного шлифования быстрорежущей стали Р18, в условиях, когда возникает достаточно высокая температура резания и в поверхностном слое устанавливается градиент химического потенциала.

После шлифования эльборовым кругом (рис. 45, б) глубина слоя с измененным содержанием углерода несколько больше, чем в первом случае, и достигает 12—13 мкм. Количество углерода на обработанной поверхности меньше, чем после алмазного шлифования, что вполне согласуется с анализом влияния факторов на диффузионное перераспределение углерода. Необходимо учитывать, что граница раздела круг—деталь перемещается в процессе шлифования в направлении длины образца, в результате чего уже успевшие обогатиться углеродом слои стали срезаются. Поэтому влияние градиентов температуры, концентрации и напряжений на перераспределение углерода и, следовательно, на характер кривых более сложное, чем, например, при трении [70].

В настоящее время проведен ряд исследований, посвященных природе физико-химического взаимодействия алмазов с обрабатываемыми материалами. При различии высказываемых положений все исследователи подтверждают главенствующую роль повышенных температур. При этом механизм, характер и интенсивность физико-химического взаимодействия в различных интервалах температур не одинаковы, так же, как различны они для разных материалов. Пока еще нет достаточных теоретических и экспериментальных

данных для строгой дифференциации явлений в контакте в интервале значений температуры, развивающейся при алмазном шлифовании. Но можно видеть, что при последовательном повышении температуры шлифования первоначально создаются условия для устранения окисных пленок на алмазах, возникновения контакта ювенильных поверхностей, резкого усиления адгезионных явлений.

На режущих зернах при резании железоуглеродистых сплавов появляются чрезвычайно тонкие пленки железа, а также частицы нароста. Наличие пленок железа как катализатора облегчает переход алмаза в графит, который, выступая как твердая смазка, снижающая силы трения и адгезии, является непосредственным источником диффундирующих атомов углерода. Для интервала температур 900—1000° С установлено усиление диффузии углерода из алмаза в армко-железо, а также в сплавах железа с углеродом. На границе с карбидообразующими элементами обнаруживаются карбиды, толщина слоя которых может соответствовать глубине диффузионного проникновения углерода. Эти карбиды интенсивно схватываются с обрабатываемым материалом, поэтому сила адгезии непрерывно возрастает. Снижению сил адгезии и трения может способствовать эвтектическое плавление алмаза в контакте с железом и другими металлами.

Сложность взаимодействия алмаза с различными материалами при повышенных температурах объясняется одновременно протеканием многих явлений — окисления, графитизации, адгезии, диффузии, образования карбидов, эвтектического плавления, механического разрушения, снижения твердости и др. Поэтому необходима разработка новых методов комплексного изучения явлений в контакте алмазного круга с различными шлифуемыми материалами.

Глава V

РАБОТОСПОСОБНОСТЬ АЛМАЗНЫХ КРУГОВ

КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ АЛМАЗНЫХ КРУГОВ

Основным критерием оценки работоспособности круга является удельный расход алмазов q , а дополнительными — шероховатость обработанной поверхности и мощность шлифования (ГОСТ 16181—70).

В качестве критерия оценки работоспособности алмазного круга иногда используют отношение объема сошлифованного материала к объему изношенной части круга [87]

$$R = V_{\text{мат}}/V_{\text{изн}},$$

где $V_{\text{мат}}$ — объем сошлифованного материала, мм^3 ; $V_{\text{изн}}$ — объем изношенной части алмазного слоя круга, мм^3 .

Оценка работоспособности характеризуется отношением удельной производительности круга при переменных условиях шлифования к удельной производительности при стандартных (постоянных) условиях шлифования. Это отношение называют относительной эффективностью шлифования.

Удельный износ алмазного круга определяют отношением объема изношенной части круга к объему сошлифованного твердого сплава [93].

Ряд исследователей считают соотношения объемов материала и износа инструмента надежной характеристикой круга, определяющей его наиболее эффективное применение. Достоинством такого критерия является возможность выбора алмазного круга с точки зрения его размерной стойкости.

Для оценки работоспособности алмазных кругов большое значение имеет критерий, характеризующий режущую способность круга Q . Режущая способность является физическим свойством алмазных шлифовальных кругов. Однако свойство это может проявляться по-разному.

Наиболее полно режущие свойства алмазных кругов могут проявиться при работе по упругой схеме шлифования и заточки. При заточке инструментов по жесткой схеме алмазные круги, имеющие различные режущие свойства, не могут их проявить. Производительность обработки при работе по этой схеме будет равной, хотя потенциальные возможности кругов могут резко отличаться. Работа с одинаковой заданной производительностью приводит к тому, что не представляется возможным получить прямой показатель производительности процесса обработки. Всякий механизм поперечной подачи, определяющий съем металла, приводит к диспропорции с тем съемом, который может обеспечить режущая способность шлифовального круга [35].

Рассматривая процесс кругового шлифования обычными абразивными кругами, Л. А. Глейзер показал, что производительность данного шлифовального круга зависит от радиального давления.

Более того, реальный смысл понятие производительность шлифовального круга может иметь только при условии,

что процесс шлифования осуществляется с определенным удельным давлением.

В процессе заточки съём материала осуществляется большим числом режущих зерен, глубина внедрения которых определяется нормальной силой, вдавливающей зерна в шлифуемое изделие. Следовательно, при заточке и шлифовании инструментов и изделий с постоянной нормальной силой режущие свойства алмазного круга будут проявлять-

ся в полной мере, и критерием режущей способности в этом случае может служить объемный съём материала в единицу времени. При этом большое значение имеет характер упругого взаимодействия шлифуемого образца с рабочей поверхностью алмазного круга.

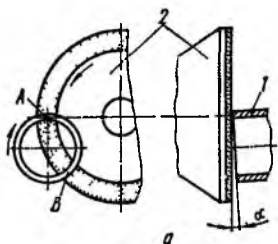


Рис. 46. Схема испытаний кругов:

а — взаимодействие круга с кольцом; *б* — профилограмма рабочей поверхности круга в радиальном направлении до работы; *в* — после работы.

На рис. 46, *а* представлена схема испытания алмазных кругов, которая применяется в ХПИ. В качестве образцов используются специальные твердосплавные кольца, применение которых обеспечивает непрерывность продольной подачи и постоянство площади контакта. Образец (кольцо 1) прижимается к рабочей поверхности круга 2; ось вращения кольца наклонена относительно оси вращения круга под углом α для обеспечения зазора в месте В, в результате чего контакт осуществляется на одном участке А. В процессе шлифования вектор скорости вращения кольца практически перпендикулярен к вектору скорости резания (имеет место лишь незначительное изменение направления, которое для круга с алмазоносным кольцом шириной 10 мм составляет $+5^\circ$). Указанное обстоятельство обеспечивает одинаковое сечение среза для всех алмазных зерен независимо от их расстояния от центра круга. Это способствует

равномерному износу поверхности алмазоносного слоя (рис. 46, б и в).

На рис. 47 показана установка, обеспечивающая описанную схему взаимодействия образца с кругом. Электродвигатель с редуктором 2 (тип $D = 220$, $n = 1,5 \dots 10$ об/мин), приводящий во вращение кольцо 1, установлен на подвижном столике 3, который перемещается на шариковых опорах

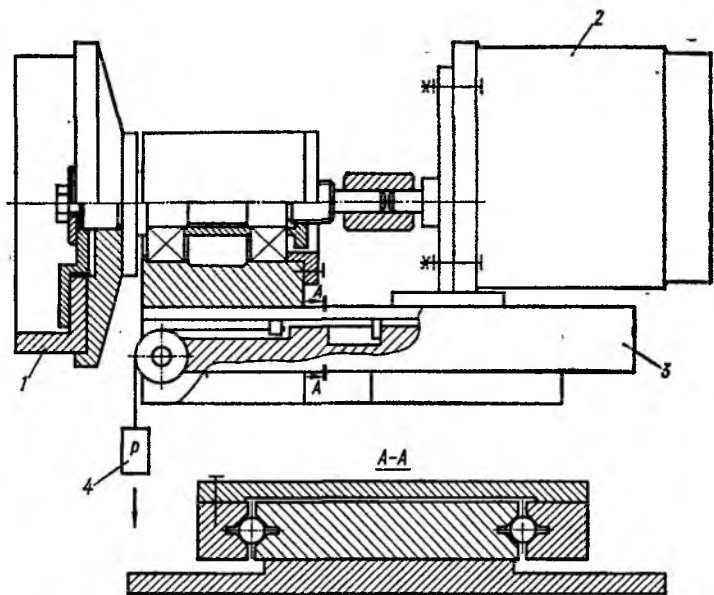


Рис. 47. Общий вид установки для испытаний алмазных кругов.

качения с помощью груза 4, обеспечивающего постоянное усилие прижима.

При испытании на этой установке сохраняется постоянная площадь контакта кругов в процессе их износа.

Описанные методы испытаний позволяют дать оценку режущей способности или производительности процесса шлифования, обеспечиваемой конкретным алмазным кругом. При этом интенсивность съема материала в единицу времени определяется по формуле $Q_m = 1000 \frac{m}{\Gamma \tau}$, где Q_m — показатель производительности процесса шлифования, $\text{мм}^3/\text{мин}$; m — масса сошлифованного за период испытания материала, г; Γ — плотность материала, $\text{г}/\text{см}^3$; τ — период работы алмазного круга, мин.

Указанные критерии не могут достаточно полно характеризовать свойства круга, которые обеспечивают наиболее эффективное его применение. Так, например, низкий удельный расход алмазов не может служить обоснованием выбора алмазного круга, так как при этом возможно сочетание весьма малой производительности обработки и высокой износостойкости круга, иными словами подобный алмазный круг обладает низкой режущей способностью. С другой стороны, повышенный удельный расход алмазов в круге еще не характеризует его плохие физические свойства, так как при этом может быть обеспечена высокая производительность обработки (при низкой износостойкости круга). Таким образом, следует обращать внимание на приемлемое сочетание режущей способности (физических свойств) и износа (стойкости), причем указанное сочетание должно выражаться таким критерием, который позволял бы производить экономическое обоснование выбора алмазного круга. Критерием, который отвечает перечисленным условиям, является удельная себестоимость обработки (параметр оптимизации) $C_{уд} = C_{с-ч}/V$, где $C_{с-ч}$ — себестоимость одного станко-часа обработки, руб.; V — часовой объем сошлифованного материала, см³.

Под себестоимостью станко-часа обработки $C_{с-ч}$ понимается часовая заработная плата производственных рабочих с начислениями на социальное страхование и часовые затраты по эксплуатации рабочего места. Часовые затраты по эксплуатации рабочего места, которые называют себестоимостью машино-часа, включают в себя также и возмещение износа алмазных кругов. Методика и анализ расчета удельной себестоимости обработки показали, что часовая заработная плата оказывает значительно большее влияние на удельную себестоимость обработки, чем износ алмазного круга [66]. Это объясняется сравнительно низкой стоимостью алмазных кругов в нашей стране. Следовательно, себестоимость процесса обработки определяется, главным образом, производительностью шлифования, т. е. режущей способностью алмазного круга.

АНАЛИЗ РАБОТОСПОСОБНОСТИ АЛМАЗНЫХ КРУГОВ В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Работоспособность алмазных кругов зависит от условий эксплуатации и свойств круга. Эти свойства определяются характеристикой круга: зернистостью, концентра-

цией, типом связки, маркой зерен и т. д. Под условиями эксплуатации понимаются режимы резания, наиболее преобладающие во влиянии на работоспособность круга. Таким образом, имеется многофакторная система, в которой требуется определить взаимосвязь между входящими факторами и изучаемыми параметрами процесса.

Основная серия опытов производилась на станке модели ЗБ642. В экспериментах использовались алмазные круги АЧК 125 × 10 × 3 и АЧК 150 × 10 × 3 на органических, керамических и металлических связках. В сравнительных экспериментах использовались круги на органических связках Б1, Б2, Б3, Б156, керамических К1 и К2 и металлических М1, МС2 и МВ1.

Зернистость алмазных кругов на органических связках изменялась в диапазоне от АСМ 28/20 до АСО 160/125, а на металлических — от АСО 50/40 до АСР 315/250. Концентрация алмазных кругов на органических связках составляла 25, 50, 100, 150, 200% на металлических — 50, 100, 150, 200%. В качестве шлифуемого образца применялся твердый сплав марки Т15К6, съем которого определялся взвешиванием на аналитических весах АДВ-200 с точностью до 1 мкг. При исследовании работоспособности кругов на бакелитовых связках эксперименты выполнялись без охлаждения; круги на керамических и металлических связках испытывались с обязательным охлаждением. В качестве СОЖ применялся трехпроцентный раствор легкого веретенного масла в воде. Подача жидкости осуществлялась поливом с расходом 2 л/мин. Продолжительность каждого опыта при однофакторных экспериментах составляла 180 мин.

Анализ работоспособности кругов в различных условиях приведен ниже.

Работоспособность алмазного круга существенно зависит от скорости резания. Ее влияние проявляется в действии двух факторов. С одной стороны, увеличение скорости резания приводит к тому, что число встреч алмазных зерен со шлифуемой поверхностью в единицу времени возрастает, с другой стороны, увеличивается скорость движения алмазных зерен по поверхности контакта с твердосплавной пластинкой. Чтобы определить влияние только скорости перемещения алмазных зерен в момент съема материала, была проведена специальная серия опытов, при которой число встреч алмазных зерен со шлифуемым материалом сохранялось постоянным. В этом случае период работы

алмазного круга по мере увеличения его скорости вращения должен уменьшаться таким образом, чтобы произведение скорости резания на время шлифования было постоянным. Если при $v_{кр} = 12,5$ м/с продолжительность шлифования составила 180 мин, то при $v_{кр} = 17,5$; 25 и 35,5 м/с время шлифования принималось соответственно 128,5, 90 и 63,3 мин.

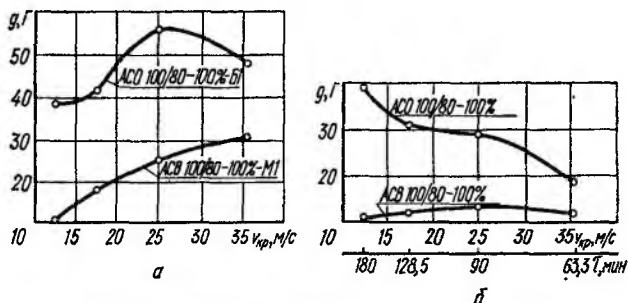


Рис. 48. Влияние скорости шлифования на суммарный съем материала g .

На рис. 48, а приведены графики, иллюстрирующие съем материала в зависимости от скорости при постоянном периоде работы круга (180 мин), т. е. когда число зерен в контакте с изделием было переменным — возрастало с увеличением скорости, и длина пути каждого зерна соответственно увеличивалась.

Для сравнения на рис. 48, б показана зависимость суммарного съема материала только от скорости перемещения зерен в теле изделия в момент резания-царапания. Из этих графиков следует, что для кругов на бакелитовой связке увеличение скорости движения алмазных зерен при постоянной длине контакта их с затачиваемой пластинкой приводит к снижению суммарного съема материала. Изменение кривой съема материала кругов на металлических связках имеет иной характер. С увеличением скорости резания количество сошлифованного твердого сплава растет; лишь при скорости шлифования, равной 35,5 м/с, наблюдается незначительное, едва заметное на графике снижение съема. Неодинаковое влияние скорости перемещения алмазных зерен на характер изменения кривых съема можно объяснить следующим. При увеличении скорости движения алмазных зерен ударное воздействие их об обрабатываемую поверхность возрастает; весьма прочные зерна марки АСВ

у кругов на бронзовой связке глубже внедряются в шлифуемое изделие и, следовательно, производят большую удельную работу по съему материала. При этом вероятность разламывания этих зерен низкая. Кроме того, бронзовая связка выполняет весьма полезную функцию прочного удержания зерен в связке. Если бы работа производилась кругами на металлической связке с зернами марки АСО, то через непродолжительный период шлифования зерна выкрашивались бы и в контакт с изделием вступила связка. В этом случае ее роль была бы отрицательной и зависимости имели бы совершенно иной характер.

В кругах на бакелитовых связках уменьшение съема материала с увеличением только скорости движения зерен объясняется тем, что в этом случае зерна марки АСО, обладающие пониженной прочностью, интенсивно выкрашиваются и степень их использования в круге уменьшается.

Таким образом, при увеличении скорости шлифования кругов на бакелитовых связках на повышение количества снятого твердого сплава основное влияние оказывает увеличение числа активных режущих зерен, царапающих обрабатываемую поверхность. Отсюда следует, что для повышения производительности шлифования при работе такими кругами следует выбирать большие окружные скорости. Это условие относится также к кругам на металлических связках, изготовленных из зерен марок АСВ и АСР.

Режущую способность алмазного круга не следует характеризовать постоянной величиной. Шлифование торцом круга на протяжении достаточно большого периода работы (240 мин) показало, что объемный съем материала в единицу времени непрерывно изменяется в некотором диапазоне и зависит от состояния режущей поверхности алмазонасного кольца в данный момент работы. Результаты этих исследований показали, что стабилизация режущей способности при постоянных условиях шлифования происходит после довольно продолжительного периода работы круга. Поэтому нельзя делать определенные выводы о производительности процесса на основании кратковременных испытаний и небольшого количества сошлифованного материала.

Устанавливая зависимость режущей способности от характеристик алмазных кругов и различных параметров резания, за ее величину следует принимать среднее значение объемного съема за весь период работы, отнесенное к единице времени.

Как видно из графиков (рис. 48), для кругов на металлической связке производительность шлифования с увеличением скорости резания растет почти пропорционально.

Таблица 17

Влияние скорости резания на критерии работоспособности кругов на связке МВ1 ($p = 0,4$ МПа, АСВ 50/40)

Критерий	$v_{кр}$, м/с			
	17,5	25	35,5	50
Q , мм ³ /мин	46,1	62,3	70	84,1
R	138	142	127	79,5
q , мг/г	0,56	0,54	0,55	0,98
$S_{уд}$, р/см ³	0,33	0,25	0,24	0,26

Это положение справедливо и для кругов на связке МВ1 (табл. 17).

Как видно из данных таблицы, с увеличением скорости резания до 35 м/с работоспособность возрастает, а при дальнейшем увеличении падает. Для сравнения в табл. 18 приведены данные для кругов на связке М1. Анализируя данные, табл. 18 и 19, можно сделать следующий вывод: во всем диапазоне скоростей резания коэффициент работоспособности для кругов на

связке М1 выше, чем на связке МВ1. Однако из этого вовсе не следует, что круги на указанной связке применять более рационально, чем на связке МВ1. Большее значение коэффициента R свидетельствует лишь о том, что размерная стойкость этих кругов выше. Сравнение кругов по главному параметру — удельной себестоимости — показывает существенное преимущество алмазных кругов на связке МВ1. Оптимальное значение скорости резания для этих связок одинаковое и равно 35 м/с.

Для кругов на органических связках кривые производительности имеют перегибы при скорости 25 м/с.

Сначала режущая способность с увеличением скорости резания повышается, что объясняется большим количеством зерен, участвующих в съеме материала, в единицу времени. Фактором, влияющим на снижение режущей спо-

Таблица 18

Влияние скорости резания на критерии работоспособности кругов на связке М1

Критерий	$v_{кр}$, м/с			
	12,5	17,5	25	35
Q , мм ³ /мин	5,05	7,6	11,25	12,5
R	154	183,5	202	190
q , мг/г	0,5	0,42	0,38	0,38
$S_{уд}$, р/см ³	2,75	1,84	1,23	1,12

способности, является повышенный износ кругов (рис. 49, а).

С увеличением скорости резания возрастает износ алмазных кругов (рис. 49, б). Однако интенсивность этого роста не одинакова. С повышением скорости резания, с одной стороны, уменьшается толщина среза, приходящаяся на каждое зерно, с другой, — возрастает ударная нагрузка на него. Эти факторы действуют по-разному, однако более

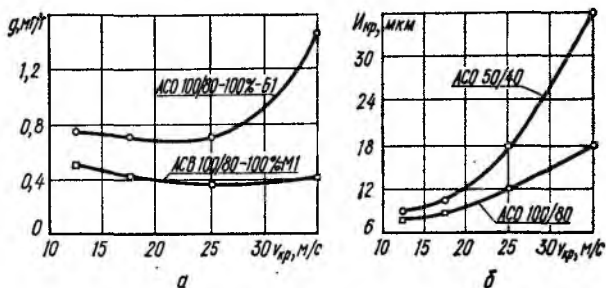


Рис. 49. Влияние скорости шлифования на износ круга:

а — удельный расход алмаза; б — размерный износ круга $I_{кр}$.

значительным оказывается ударное воздействие, которое и приводит к понижению износостойкости кругов. Кроме того, при повышении нагрузок бакелитовая связка не оказывает достаточного сопротивления изнашиванию. С увеличением скорости резания резко возрастает уровень развивающихся в зоне контакта температур, что приводит к частичному выгоранию связки. Мелкозернистые круги имеют большие значения износа во всем диапазоне скоростей резания по сравнению с кругами средних и крупных зернистостей, причем с увеличением скорости интенсивность износа их возрастает в большей степени. Это можно объяснить следующим. При повышенных скоростях резания толщина среза отдельным алмазным зерном мелкозернистого круга намного меньше, чем крупнозернистого, потому что число зерен на единице поверхности алмазоносного кольца, например, у круга АСО 50/40 в четыре раза больше, чем у круга АСО 100/80. Поэтому и условные напряжения резания на поверхности зерна мелкозернистых кругов будут значительно больше, чем у кругов крупных зернистостей. Это будет способствовать более интенсивному выкрашиванию и разрушению алмазных зерен. Из сравнения

зависимостей удельной себестоимости обработки от скорости резания для кругов на связках Б1 и Б156 при $p = 0,1$ МПа (рис. 50) видно, что наименьшее значение себестоимости обработки находится у этих кругов примерно на одном уровне, обеспечиваемом скоростью резания $v_{кр} = 20... 25$ м/с.

Нормальное давление при шлифовании торцом круга является наиболее важным фактором, от которого зависит

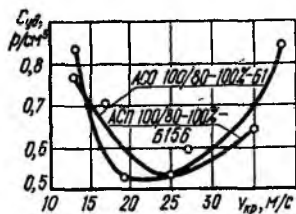


Рис. 50. Зависимость удельной себестоимости обработки от скорости резания.

производительность процесса обработки. Изменение режущей способности происходит вследствие увеличения степени самозатачивания шлифовальных кругов. При низких нагрузках происходит постепенное истирание и округление зерен, в результате чего на их поверхностях появляются площадки износа. При повышении нагрузок от зерен начинают откалываться частички аб-

разивного материала, при этом оставшиеся в связке зерна сохраняют режущие свойства, способствуя восстановлению режущей способности круга.

Пропорциональность скорости съема нормальному усилию будет иметь место лишь в том случае, когда круг работает с самозатачиванием. При условии, когда круг при- тупляется, коэффициент пропорциональности будет изменяться в течение всего периода шлифования соответственно потере кругом режущей способности [1].

Алмазные шлифовальные круги сохраняют режущую способность на протяжении продолжительного периода работы, так как они обладают высокой самозатачиваемостью. Поэтому при шлифовании этими кругами в большей степени, чем при обработке какими-либо другими абразивными кругами, следует ожидать пропорционального съема материала с возрастанием нормального давления.

При работе кругами на металлических связках при увеличении нормального давления суммарный съем твердого сплава во времени равномерно возрастает и, следовательно, повышается средняя производительность обработки (рис. 51). Это объясняется тем, что с увеличением прижимной силы возрастает нормальная нагрузка, приходящаяся на единичное алмазное зерно, в результате чего оно глубже внедряется в обрабатываемую поверхность и выполняет большую рабо-

ту по съему материала. Кроме того, с повышением нормального давления самозатачиваемость кругов увеличивается. Повышение скорости съема у кругов на связках Б1 и К5 при увеличении прижимного усилия сопровождается значительным износом связок. При возрастании нагрузок степень использования алмазных зерен марки АСО в этих кругах уменьшается, поэтому, хотя производительность процесса повышается, наблюдается увеличение стоимости обработки.

Металлическая связка М1 прочно удерживает алмазные зерна и сама изнашивается весьма незначительно. Следовательно, при повышенных нагрузках на постепенно притупляющихся алмазных зернах появляются площадки износа, в результате чего проникающая способность этих зерен уменьшается. Кроме того, связка постепенно приближается к шлифуемой поверхности и при определенных условиях начинает соприкасаться с изделием, что приводит к снижению режущей способности круга. Из приведенных графиков (рис. 51) следует также, что производительность обработки, достигаемая при сопоставимых условиях кругами на органических связках, выше, чем на металлических.

С повышением нормального давления абсолютный размерный износ алмазных кругов возрастает, что объясняется увеличением удельной нагрузки на поверхности алмазного кольца. Для кругов на бакелитовых связках наибольшая интенсивность износа имеет место при увеличении давления от 0,2 до 0,3 МПа, а для кругов на керамических связках К5 — от 0,3 до 0,4 МПа, что объясняется прочностью связки, удерживающей алмазные зерна, а также прочностью самих зерен. Например, при удельном давлении $p = 0,4$ МПа керамическая связка К5 начинает сильно изнашиваться и естественно, что полезное использование алмазных зерен будет весьма незначительным. Кроме того, используемые в названных кругах алмазные зерна обычной прочности АСО, как известно, обладают высокой хрупкостью и чрезвычайно чувствительны к повышенным нагрузкам. Исходя из вышеизложенного, нормальное давление

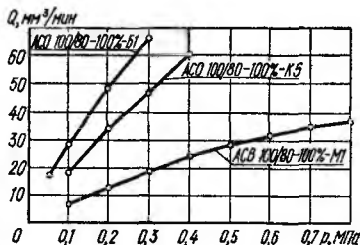


Рис. 51. Влияние давления на режущую способность круга.

для бакелитовых связок не следует принимать свыше 0,2 МПа. В результате исследования работоспособности кругов из натуральных алмазов [93] установлено, что предел перегрузки круга на органической связке достигается при $p = 0,3$ МПа.

При эксплуатации алмазных кругов на керамических связках К5 давление не должно превышать 0,3 МПа.

У кругов на металлической связке М1 из алмазов марки АСВ общая тенденция увеличения износа с повышением

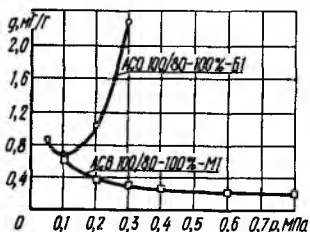


Рис. 52. Влияние давления на удельный расход алмазов.

нормального давления сохраняется, однако интенсивность этого роста снижается. Это обстоятельство следует объяснить двумя главными факторами, выгодно отличающими эти круги от предыдущих: во-первых, прочностью бронзовой связки М1 и, во-вторых, качественным преимуществом самих алмазных зерен марки АСВ. Механизм износа зерен марок АСВ и АСО различен. В отличие от зерен марки АСО преобладающим видом износа весьма прочных зерен марки АСВ следует считать истирание. Этот вид износа неизменно наступает после приработки зерен вновь заправленного круга. Под процессом приработки здесь следует понимать выкрашивание и сколы наиболее выступающих кромок единичного алмазного зерна; ввиду меньшей хрупкости и значительно большей прочности материала зерна новые режущие кромки могут не образоваться или же образоваться в незначительном количестве. Образование площадок износа приводит к возрастанию сопротивления износу зерен, так как нагрузки на единицу поверхности этих площадок будут понижаться. При значительных нагрузках равная степень притупления зерен достигается за более короткий срок и, следовательно, раньше начинает замедляться размерный износ круга. Вот почему с увеличением нормального давления интенсивность возрастания размерного износа понижается.

На рис. 52 приведена зависимость удельного расхода алмазов от нормального давления при условии, что за показатель износа принят удельный расход алмазов. Удельный расход алмазов при работе кругами на бакелитовой связке имеет наименьшее значение при удельном давлении

$p = 0,1$ МПа. Несколько большее значение удельного расхода при $p \approx 0,05$ МПа объясняется малым съемом шлифуемого материала, причем уменьшение съема материала происходит в большей степени, чем понижение износа круга. При увеличении давления свыше 0,1 МПа расход алмазов резко повышается и, несмотря на общее увеличение съема материалов, обнаруживается значительный износ круга.

При работе кругами на металлической связке М1 кривая удельного расхода приобретает тенденцию к снижению. Это можно объяснить чрезвычайно высокой износостойкостью кругов на этой связке. Полученный характер кривой отражает тот факт, что с увеличением нормального давления съем материала растет в большей степени, чем увеличивается расход алмазов.

Удельная себестоимость обработки твердого сплава зависит от нормального давления, так как оно оказывает существенное влияние на износ алмазного круга и режущую способность. Кроме того, нормальное давление большое влияние оказывает на мощность шлифования, т. е. на себестоимость электроэнергии. Влияние этих величин на удельную себестоимость обработки проявляется по-разному и весьма своеобразно. Например, в общем случае с увеличением нормального давления возрастает износ алмазного круга и мощность резания, что, с одной стороны, должно привести к удорожанию процесса обработки. С другой стороны, в этих условиях заметно повышается производительность обработки, что должно привести к уменьшению удельной себестоимости. Таким образом, задача состоит в том, чтобы определить такое сочетание перечисленных составляющих себестоимости, при котором процесс шлифования был бы наиболее экономичным.

Характер зависимостей себестоимости обработки от нормального давления для кругов на бакелитовой и керамической связках (АСО 100/80 — 100% — Б1 и АСО 100/80 — 100% — К5) показывает, что с увеличением нормального давления удельная себестоимость обработки вначале понижается до определенной величины, а затем начинает возрастать (рис. 53, а). До значения нормального давления, равного 0,2 МПа, для кругов на связке Б1 и 0,3 МПа для кругов на связке К5, съем шлифуемого материала возрастает в значительно большей степени, чем износ алмазных кругов, поэтому себестоимость обработки понижается. При дальнейшем увеличении давления износ алмазных кругов

настолько возрастает, что, несмотря на общее повышение производительности обработки, экономичность процесса понижается. Составляющая себестоимости энергии с повышением нормального давления непрерывно повышается, но это увеличение по сравнению с влиянием износа и производительности незначительно и поэтому несущественно изменяет характер зависимости. Смещение кривой себестоимости обработки для кругов на керамической связке впра-

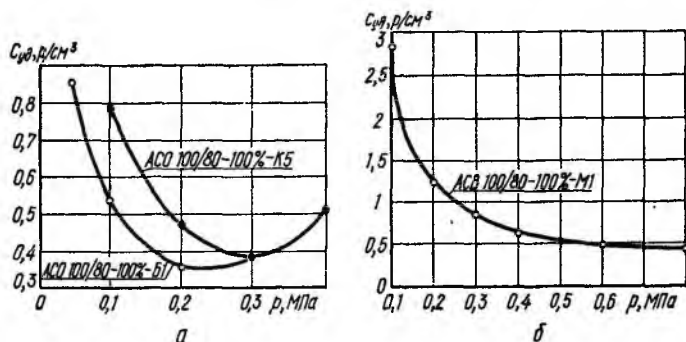


Рис. 53. Зависимость удельной себестоимости от давления:
а — связки Б1, К5; б — связка М1.

во, в сторону увеличенных удельных давлений, объясняется повышенной прочностью связки К5 по сравнению со связкой Б1.

Зависимость себестоимости обработки от нормального давления для круга на металлической связке М1 с зернистостью АСВ 100/80—100% концентрации приведена на рис. 53, б. Из графика следует, что увеличение нормальной нагрузки приводит к снижению стоимости обработки. Это объясняется тем, что в кругах из алмазов марки АСВ увеличение нагрузок мало отражается на износе, в то время как режущая способность при этом непрерывно возрастает. Наибольшая интенсивность снижения себестоимости обработки наблюдается при изменении нормального давления от 0,1 до 0,4 МПа. Это связано с наибольшей степенью возрастания производительности процесса в этом диапазоне давлений. Из графика также следует, что алмазные круги на металлической связке целесообразно, с точки зрения себестоимости обработки, эксплуатировать при повышенных нагрузках, на предварительных операциях шлифования и заточки.

Из сравнения графиков (рис. 53, а и б) можно сделать вывод, что общий уровень удельной себестоимости, достигаемый при работе кругами на бакелитовой связке, располагается ниже, чем на металлической и керамической. Это объясняется тем, что в нашей стране сравнительно низкая стоимость алмазных кругов, вследствие чего потеря вещества

Таблица 19

Влияние давления на критерии работоспособности кругов на связке МВ1

Критерий	Р, МПа			
	0,1	0,3	0,4	0,6
Q, мм³/мин	28	58	70	150
q, мг/г	1,02	0,57	0,55	0,96
$\frac{C_{уд}}{p}$, р/см³	0,57	0,29	0,22	0,18

Таблица 20

Влияние давления на критерии работоспособности кругов на связке Б156

Критерий	Р, МПа			
	0,1	0,2	0,3	0,4
Q, мм³/мин	32	40	46	54
q, мг/г	0,64	0,61	0,62	0,68
$\frac{C_{уд}}{p}$, р/см²	0,42	0,37	0,35	0,3

круга не может существенно повлиять на себестоимость обработки. Поэтому в большинстве случаев решающим фактором при выборе кругов является производительность обработки.

Результаты анализа работоспособности алмазных кругов на связках МВ1 и Б156 показали, что наименьшая удельная себестоимость достигается при эксплуатации их с повышенными нагрузками (табл. 19 и 20). Несмотря на повышенный удельный расход, это достигается главным образом за счет большей производительности шлифования. Работоспособность кругов определяется их характеристикой. Исследования, проведенные с помощью методов планирования экспериментов, показали незначительное влияние зернистости на удельную себестоимость обработки, что, главным образом, относится к кругам на металлических связках. Это подтверждается результатами однофакторных экспериментов (табл. 21).

Таблица 21

Влияние зернистости на критерии работоспособности кругов на связке МВ1

Критерий	Зернистость			
	50/40	100/80	60/125	250/200
Q, мм³/мин	62,3	58	63,9	82
q, мг/г	0,54	0,49	0,58	0,62
$\frac{C_{уд}}{p}$, р/см³	0,25	0,27	0,25	0,2

Как видно из данных таблицы, крупнозернистые круги являются более производительными и потому, несмотря на больший удельный расход, удельная себестоимость обработки у них наименьшая. Вместе с тем существенного различия по себестоимости этих кругов при экономическом обосновании их выбора не обнаруживается. Более заметно изменяется производительность: крупнозернистые круги на металлических связках обладают повышенной режущей способностью.

Таблица 22

Влияние зернистости на критерии работоспособности на связке Б156 из алмазов АСР

Критерий	Зернистость			
	50/40	100/80	125/100	60/125
Q , мм ³ /мин	28	40	38	36
q , мг/г	0,5	0,62	0,8	1
$C_{уд}$, р/см ³	0,52	0,38	0,4	0,45

расход алмазов, например, для зернистости 100/80 $q = 0,2$ мг/г (для МВ1 $q = 0,49$ мг/г). Однако из этого не следует, что их применять более рационально: ввиду низкой самозатачиваемости, их режущая способность уступает кругам на связке МВ1. Поэтому себестоимость обработки кругами на связке М1 выше, чем на связке МВ1. Например, для тех же условий и характеристик удельная себестоимость обработки твердого сплава кругом на связке М1 $C_{уд} = 0,37$ р/см³, а кругом на связке МВ1 — $C_{уд} = 0,27$ р/см³.

В кругах на органических связках Б1 и Б156 наименьшая себестоимость достигается при ином оптимальном значении зернистости. У кругов на связке Б1 наибольшая производительность достигается при работе мелкозернистыми кругами АСО 50/40 и АСО 63/50. Повышенная режущая способность этих кругов по сравнению с кругами АСО 160/125 объясняется, во-первых, большим числом активных рабочих зерен, приходящихся на единицу поверхности алмазонасного кольца, и, во-вторых, лучшей их самозатачиваемостью. Следовательно, наименьшая себестоимость обработки достигается при использовании мелкозернистых кру-

Подобные соотношения справедливы и для кругов на металлической связке М1 из алмазов марки АСВ. Однако эти круги обеспечивают меньший уровень производительности и, следовательно, удельная себестоимость обработки ими будет выше. Следует отметить, что круги на связке М1 обладают высокой износостойкостью и удельный рас-

гов. Например, $C_{уд}$ для круга АСО 50/40 составляет $0,46 \text{ р/см}^3$, а для круга АСО 160/125 — $0,78 \text{ р/см}^3$.

Результаты экспериментов, полученные для круга на связке Б156, приведены в табл. 22.

Как видно из данных таблицы, для связки Б156 наименьшая себестоимость достигается кругом зернистостью АСР 100/80, т. е. по сравнению с кругами на связке Б1 смещается в зону более крупных зернистостей. Это объясняется, главным образом, повышенной прочностью связки Б156.

Если оптимальная зернистость алмазного круга не является однозначно и в различных условиях работы может смещаться в зону более крупных или мелких зернистостей, то концентрация алмазного круга влияет на критерии его оценки более однозначно.

Результаты большого количества экспериментальных работ на различных связках показали, что оптимальной, при которой достигается наименьшая удельная себестоимость, является 100%-ная концентрация алмазного круга [66]. Однако из этого не следует, что круги 100%-ной концентрации обеспечивают во всех случаях наибольшую производительность и износостойкость. Имеется в виду лишь благоприятное сочетание указанных параметров. Так, например, у кругов на связке М1 наименьший удельный расход алмазов $q = 0,19 \text{ мг/г}$ при 50%-ной концентрации, а у кругов на связке Б1 — при 150%-ной. Наибольшее возрастание средней режущей способности имеет место при увеличении концентрации алмазов от 25 до 50%-ной.

У кругов 25%-ной концентрации ввиду значительно меньшего числа алмазных зерен на поверхности в контакт с обрабатываемым изделием быстро вступает связка, причем, учитывая большие расстояния между зернами, следует предположить, что поверхность этого контакта будет значительной. В результате этого в зоне резания наблюдается значительное теплообразование, приводящее к частичному выгоранию бакелитовой связки и осыпанию зерен. Понижение средней режущей способности кругов 150- и 200%-ной концентрации вызвано следующим. Как известно, при увеличении концентрации число зерен на единице поверхности возрастает, что должно привести к повышению режущей способности кругов. В действительности это имеет место лишь при увеличении концентрации до определенного оптимального значения (100%). При дальнейшем увеличении концентрации начинает проявляться новый фактор: увеличение

числа зерен на поверхности круга при постоянном давлении приведет к тому, что удельные нагрузки на единичные зерна резко снизятся и, следовательно, глубина проникновения зерен в шлифуемую поверхность уменьшится. Ввиду того, что нормальные нагрузки на зерна понизятся, способность к возобновлению режущих кромок станет ограниченной, круги будут засаливаться и, естественно, режущая способность таких кругов будет уменьшаться.

Влияние концентрации алмазных кругов на органических связках на съем твердого сплава исследовалось также в ряде работ [52, 89, 93, 94, 97].

Согласно некоторым экспериментальным данным увеличение концентраций приводит к повышению съема твердого сплава, что объясняется усиленным износом круга, приводящим к самозатачиванию, при котором постоянно принимают участие в процессе новые алмазные зерна. Причем по характеру приведенных зависимостей можно сделать вывод о предполагаемом возрастании съема твердого сплава при увеличении концентрации выше 100%-ной. Не отрицая такую возможность для приводимых условий эксперимента, следует более подробно на них остановиться, так как это имеет принципиальное значение. При работе кругами из натуральных алмазов зернистостью 40/28 действительно может иметь место повышенный износ кругов с увеличением концентрации, что будет способствовать возобновлению их режущей поверхности. Следует отметить, что механизм износа кругов на бакелитовых связках из натуральных и синтетических алмазов неодинаков и, что с увеличением концентрации, износ кругов из синтетических алмазов уменьшается. Это связано с весьма прочным удержанием зерен синтетических алмазов в связке. Зерна из натуральных алмазов, как правило, испытывают повышенные нагрузки, приводящие либо к выламыванию частиц зерна, либо к его мелкому выкрашиванию. Поэтому у кругов из натуральных алмазов на бакелитовой связке возобновление режущей поверхности происходит более интенсивно (особенно у мелкозернистых).

В работах С. А. Попова и И. П. Малевского приводится график изменения режущей способности в зависимости от содержания алмазов в круге, из которого следует, что с увеличением концентрации алмазов режущая способность кругов повышается. Эта зависимость вполне справедлива для тех условий и периода шлифования (30 мин), которые

применялись при исследовании. Однако, как было указано, при большей продолжительности шлифования кругами из синтетических алмазов, максимум средней режущей способности сместится в сторону меньших концентраций.

Максимальная скорость съема твердого сплава достигается при работе кругами 100%-ной концентрации на связке М1. Бронзовая связка прочно удерживает алмазные зерна и выпадение алмазных зерен из связки, даже при сравнительно высоких нагрузках ($p = 0,4$ МПа) происходит в редких случаях. Поэтому механизм самозатачивания этих кругов иной, чем кругов на бакелитовых связках. У кругов на металлических связках происходит, главным образом, самозатачивание самих зерен, т. е. микроразрушение их вершины с образованием новых режущих кромок. При шлифовании кругами высоких концентраций степень самозатачивания алмазных зерен понижается, так как падают нагрузки на единичные зерна. Это приводит к притуплению зерен и, следовательно, к понижению режущей способности таких кругов.

Интересно также отметить, что с увеличением концентрации алмазов размерный износ кругов для всех видов связок понижается.

В ряде работ [89, 93, 97] имеются существенные противоречия в вопросе влияния концентрации алмазов на износ кругов. Несоответствие приведенных данных, очевидно, объясняется тем, что в кругах были использованы зерна натуральных алмазов различных типов и форм, на что, возможно, не было обращено внимания. Между тем износ этих зерен различный. Еще более принципиальное различие в характере износа наблюдается при сравнении работы натуральных зерен с работой синтетических. Износ зерен синтетических алмазов, как было показано ранее, происходит в результате хрупкого микроразрушения вершины, при этом постоянно образуются новые острые режущие кромки. У натуральных алмазов износ происходит как вследствие сколов, так и истирания зерен с образованием площадок износа. Процесс истирания ведет к увеличению площади контакта между зерном и обрабатываемым материалом. Следовательно, в этом случае на зерно будут действовать повышенные нагрузки, приводящие либо к выламыванию частиц зерна, либо к его полному выкрашиванию. Вот почему у кругов из натуральных алмазов с повышением концентрации может иметь место повышенный расход алмазов,

являющийся, главным образом, результатом выпадания большого числа зерен из органической связки. У кругов из синтетических алмазных зерен, прочность удержания которых в связке Б1 значительно выше, повышение износостойкости с возрастанием концентрации объясняется, главным образом, уменьшением содержания наполнителя в связке. Действительно, зерна карбида бора либо белого электрокорунда имеют низкую прочность и высокую дробимость и при работе довольно быстро разламываются и выкрашиваются из связки. Естественно, что после интенсивного разрушения и выпадания зерен карбида бора прочность мостиков связки алмазных зерен резко понижается, уменьшается жесткость их закрепления. Все это приводит к повышенному износу кругов низких концентраций.

УПРАВЛЕНИЕ РЕЖУЩЕЙ СПОСОБНОСТЬЮ АЛМАЗНЫХ КРУГОВ

Потенциально высокие режущие свойства алмаза и алмазных кругов реализуются не всегда в полной мере, а количественные характеристики режущей способности кругов

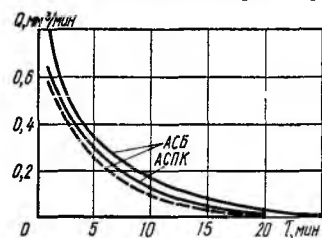


Рис. 54. Зависимость производительности от продолжительности шлифования кругами АСР 125/100—100%—Б1 (сплошная линия) и АСВ 125/100—100%—МВ1 (штриховая линия) алмазных поликристаллов с $v_{кр} = 30$ м/с, $S_{пр} = 1$ м/мин; $p = 1$ МПа.

могут колебаться при обработке одного и того же материала в широких пределах. Так, при алмазном шлифовании синтетических сверхтвердых поликристаллов кругами на металлической связке в первые 10—15 мин работы производительность обработки падает практически до нуля, а рабочая поверхность круга претерпевает изменение, близкое к заполировыванию (рис. 54). При этом вследствие усиления трения происходит интенсивный разогрев поликристаллов, приводящий к их растрескиванию.

Все это подчеркивает важность задачи управления режущей способностью алмазных кругов. Основой управления режущей способностью кругов является дозируемое воздействие на их рабочую поверхность с целью удаления

продуктов шлифования из межзеренных впадин, обеспечения необходимого удаления связки от вершин максимально выступающих зерен, обновления режущих поверхностей алмазных зерен. Некоторые виды физического воздействия на рабочую поверхность не только решают указанные задачи, но и обеспечивают изменение прочностных характеристик как связки алмазных кругов, так и непосредственно алмазных зерен.

Главным исходным условием, обеспечивающим высокую работоспособность, является создание алмазных кругов, свойства которых отвечают условиям и требованиям эксплуатации. Эта задача решается разработкой связок с наперед заданными прочностными, фрикционными, теплофизическими и другими свойствами; правильным выбором исходного алмазного сырья с требуемой прочностью, покрытиями, однородностью, формой и характером поверхности зерен и т. д.; соответствующими технологическими приемами при спекании кругов, например, термообработкой, и др. Однако реализация исходных режущих свойств алмазных кругов возможна при условии направленного регулирования их рабочей поверхности.

В ряде случаев эта задача успешно решается правильным выбором характеристики круга и режимов шлифования, например, шлифование твердых сплавов кругами на органической связке. Но и в этом случае процесс шлифования можно интенсифицировать за счет дозируемого специального воздействия на рабочую поверхность. Дозируемое воздействие на рабочую поверхность круга существенно расширяет технологические возможности алмазного инструмента. В этом можно убедиться на примере обработки сверхтвердых поликристаллов алмаза и твердых нитридов бора.

До появления синтетических сверхтвердых поликристаллов (ССТП) марок АСБ и АСПК был накоплен некоторый опыт обработки природных алмазов, который не мог обеспечить массового производства инструмента из ССТП. Применение методов обработки природных алмазов оказалось нецелесообразным в основном из-за их низкой производительности. Для обработки ССТП стали применять шлифование алмазными кругами на органической связке, шлифование алмазными кругами на металлической связке, шлифование алмазными кругами на металлической связке с введением в зону резания активного окислителя, электролитическое алмазное шлифование.

Алмазные круги на органической связке быстро изнашиваются и не обеспечивают экономически выгодной производительности и качества обработки. Круги на металлической связке имеют высокую производительность лишь в первые несколько минут шлифования, после чего теряют режущую способность. Потери времени на ее восстановление соизмеримы с полезным машинным временем. Введение в зону резания натриевой и калиевой селитры, которые при высокой температуре зоны шлифования разлагаются с выделением атомарного кислорода, повышает производительность обработки. Однако этот метод реализуется лишь при высоком уровне температуры в зоне шлифования, что отражается на прочности поликристалла и качестве обработки, а также на расходе алмазных зерен.

Эффективным является электроалмазное шлифование поликристаллов, однако этот метод может быть применен лишь к разновидностям поликристаллов, обладающих электропроводностью.

Другие методы обработки алмазных поликристаллов (с использованием ультразвука, электронным лучом, лучом лазера, термическим воздействием и т. д.) имеют пока ограниченное применение и не являются универсальными [16].

Таким образом, можно считать, что наиболее эффективными могут оказаться такие процессы шлифования поликристаллов ССТП алмазными кругами, при которых появляется возможность наиболее экономичного постоянного поддержания их высокой режущей способности.

Шлифование алмазным кругом на токопроводящей связке позволяет осуществлять периодическое или непрерывное автономное физико-химическое воздействие на связку алмазного круга с целью повышения производительности обработки, поддержания высокой режущей способности кругов и улучшения качества обработки в процессе шлифования поликристаллов. Сущность этого воздействия состоит в электролитическом растворении и электроэрозионном разрушении связки и удалении продуктов шлифования, в результате чего алмазные зерна постоянно выступают из связки, обновляются и более прочно удерживаются. Данный способ осуществляется по схеме, приведенной на рис. 55.

Алмазный круг 3 на токопроводящей связке является положительным электродом (анодом), а специальный катод 6 — отрицательным электродом в технологической цепи

постоянного тока. Подачу электролита удобно осуществлять через внутреннюю полость этого устройства. После стабилизации скорости истечения электролита включается выпрямитель. Схема позволяет поддерживать необходимый

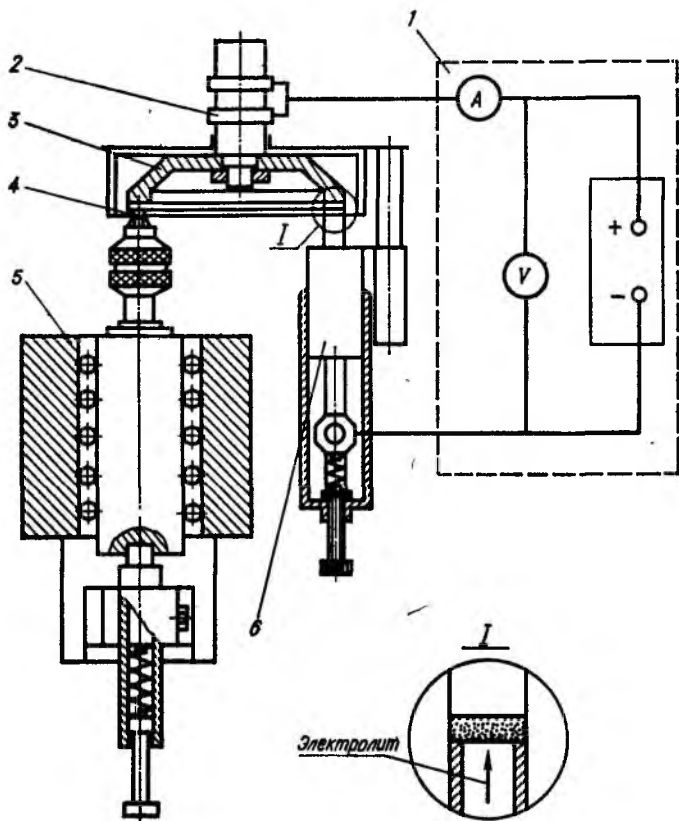


Рис. 55. Схема шлифования синтетических поликристаллов алмаза с физико-химическим воздействием на связку алмазного круга:
 1 — источник тока; 2 — токосъемное устройство; 3 — шлифовальный круг; 4 — обрабатываемый поликристалл; 5 — приспособление; 6 — катод.

электрический режим, обеспечивающий требуемую интенсивность электролитического процесса и электроэрозии.

Результаты проведенных исследований и опыт внедрения на производстве показали, что применение предлагаемого

способа позволяет повысить производительность обработки в 5—10 раз и снизить расход алмазов в 1,5—2 раза.

Такие же результаты можно получить электроэрозионным воздействием на связку круга. Источником в этом случае могут служить импульсные генераторы, например ШГИ-40-440 [64].

Глава VI

КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ И СОСТОЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ

ФОРМИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКОГО РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ И ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ

Формирование физического рельефа поверхности и поверхностного слоя при алмазном шлифовании определяется механизмом работы режущих зерен круга, уровнем развивающихся в зоне шлифования сил и температуры, физико-химическим взаимодействием алмаза с обрабатываемым материалом, а также воздействием на него связки круга. Влияние всех этих факторов тесно связано друг с другом и выделить самостоятельное действие какого-либо из них в «чистом» виде весьма сложно. Суммарным результатом их воздействия является состояние поверхностного слоя детали после обработки. Механизм резания алмазным зерном по своей сути отличается от механизма резания зерном из других абразивных материалов.

Как уже отмечалось, силы при алмазном шлифовании в несколько раз меньше, чем при шлифовании твердых сплавов кругами марки КЗ, а сталей — кругами марки ЭБ. При этом изменяется не только величина сил, но и соотношение между отдельными их составляющими. Если при шлифовании твердых сплавов абразивными кругами радиальная сила в 5—6 раз больше тангенциальной, то при алмазном шлифовании это соотношение уменьшается почти в 2 раза и становится равным приблизительно 2,5—3,5. Вследствие этого материал поверхностного слоя в процессе алмазного шлифования подвержен меньшему воздействию динамического фактора.

При оптимальных условиях алмазного шлифования температура резания значительно ниже, чем при обработке кругами из обычных абразивных материалов. Меньшая теп-

ловая напряженность процесса способствует снижению отрицательных изменений в поверхностном слое — прижогов, микротрещин, структурных изменений.

Для формирования физического рельефа обработанной поверхности особую роль играют контактные явления на поверхности алмаза и обрабатываемого материала. Это можно проследить на примере алмазного шлифования инструментальных материалов.

В процессе шлифования кругами из карбида кремния удаление припуска осуществляется путем дробления, раскалывания и вырывов зерен твердого сплава и минералокерамики. Поэтому тончайший поверхностный слой формируется из этих сильно деформированных и разрушившихся зерен. Высокие температуры в зоне резания вызывают резкое повышение пластичности материала поверхностного слоя. Пластическое вязкое течение способствует распределению материала по поверхности. Мелкозернистые круги быстрее засаливаются, в зоне их работы развиваются более высокие температуры, поэтому пластически текущий материал распределяется по всей поверхности обработки. Толщина его столь значительна, что скрыты вырывы, дробления, поры и т. д. При обработке крупнозернистыми кругами также наблюдается пластическое течение (см. рис. 22), но в ряде случаев в результате дробления и сильных вырывов вскрываются участки, где просматриваются деформированные зерна сплава. Этим, очевидно, можно объяснить более неоднородный характер поверхности, обработанной крупнозернистыми кругами марки КЗ.

Наличие в поверхностном слое наряду с раскалыванием, дроблением и вырывами пластического течения материала подтверждает существующие взгляды на природу образования поверхности при полировании и шлифовании. Большинство исследователей так или иначе связывают образование поверхностного слоя с ожигением материала или резким повышением его пластичности, а не с переносом кристаллических тел. Образование аморфного слоя наблюдается также и на неметаллических поверхностях.

Таким образом, условия, в которых формируется поверхностный слой при абразивном шлифовании твердых сплавов, не исключают образования аморфного слоя, а электронно-микроскопические снимки поверхности подтверждают наличие распределения по обрабатываемой поверхности пластически текущего материала.

Под влиянием высокой температуры, развивающейся в зоне шлифования кругами марки КЗ, в поверхностном слое твердого сплава образуется сетка микротрещин, которая является одним из главных дефектов инструмента после абразивной обработки. Распределенный слой, образующийся в результате пластического течения, может скрывать сетку микротрещин. Однако микротрещины хорошо наблюдаются в электронном микроскопе (рис. 56).

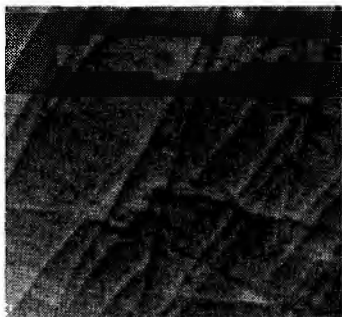


Рис. 56. Сетка микротрещин на твердом сплаве ВК6 после шлифования мелкозернистым кругом из карбида кремния, $\times 5000$.

Легко различаются микротрещины, направление которых перпендикулярно к следам обработки. Они практически прямолинейны. Лишь отдельные микротрещины, совпадающие с направлением следов обработки, имеют ломанно-извилистый характер.

Некоторые исследователи [27] высказывают мысль о том, что разрушение происходит по кобальтовой связке. Другие склонны считать, что разрушение происходит по зернам карбида. Прямолинейный характер микротрещин на приведенных на рис. 56 электронно-микроскопических снимках был бы невозможен, если бы разрушение происходило только по кобальтовой связке. Ломанный характер некоторых участков на продольных трещинах также не может служить достаточным основанием для подтверждения второй точки зрения, так как поверхность разрушения зерна карбида вольфрама не обязательно должна быть плоской. Кроме того, на снимках хорошо видны более мелкие, почти параллельные микротрещины, расстояние между которыми значительно меньше размеров зерна карбидов вольфрама, а протяженность намного больше его. Это является следствием того, что микротрещины на твердых сплавах под влиянием условий шлифования кругами марки КЗ проходят как по зернам карбидов сплавов, так и по кобальтовой связке.

На основании изложенного строение поверхностного слоя твердосплавного инструмента после обработки кругами из карбида кремния можно представить следующим

образом. На самой поверхности находится аморфный слой, образовавшийся в результате распределения (размазывания) пластически текущего материала, свойства которого определяются уровнем усилий и температуры, развивающихся в зоне резания. Под ним находятся раздробившиеся и расколовшиеся зерна карбидов, затем слой материала, претерпевший влияния высоких температур и, наконец,

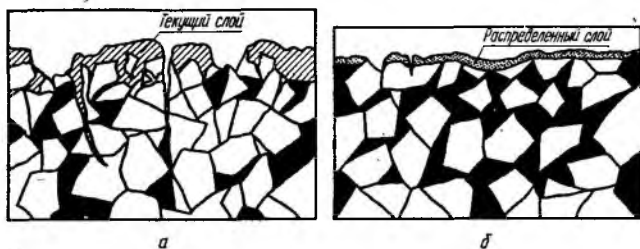


Рис. 57. Схема строения поверхностного слоя твердого сплава после абразивного (а) и алмазного (б) шлифования.

материал с исходными физико-механическими свойствами. От поверхности вглубь могут идти макро- и микротрещины. В ряде мест на поверхности имеются вырывы (рис. 57, а).

Приведенная схема отражает изменение состояния материала в поверхностном слое и соответствует механизму работы абразивного круга. Физико-механические свойства материала поверхностного слоя в этом случае отличаются от исходных.

Поверхность после обработки минералокерамики покрыта распределенным тонким слоем спрессованной массы мельчайших пылевидных частичек. Признаков интенсивного пластического течения материала или сильного размягчения не обнаруживается. Такой же слой, а чаще с признаками незначительного размягчения, образуется на твердых сплавах. Толщина его столь незначительна, что даже характерные для твердых сплавов розетковые поры не скрываются этим слоем (рис. 58). Раздробившиеся до пылевидных частицы (стружка), находясь в зоне шлифования между неровностями алмазонасного слоя круга и обрабатываемым материалом, распределяются по поверхности обработки и спрессовываются под действием сил шлифования. Этот слой прочно удерживается на поверхности и после окончания процесса шлифования.

В ряде случаев на электронно-микроскопических снимках поверхности после алмазной обработки наблюдались такие участки, на которых отчетливо видны отдельные зерна сплавов (рис. 59). По-видимому, причина появления этих

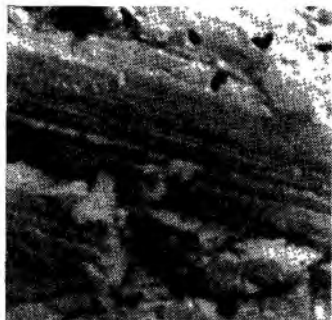


Рис. 58. Участок поверхности твердого сплава ВК6 с розетковыми порами после алмазного шлифования, $\times 3000$.

участков такая же, как и в случае абразивной обработки, с той лишь разницей, что при абразивной обработке вырываются целые зерна и их блоки, а при алмазной величина вырывов соизмерима лишь с небольшими осколками зерен сплавов. Претерпевая срез при обработке алмазным кругом, зерна сплавов могут настолько ослабляться, что раскалывание их становится неизбежным. Это приводит к ослаблению связей отколовшихся частей с соседними зернами и к вырыву этих частей из сплава.

Исходя из изложенного, схему поверхностного слоя твердосплавного инструмента после алмазной обработки можно представить следующим образом (см. рис. 57, б). На самой поверхности находится тонкий слой, представляющий собой уплотненную массу мельчайших частиц или пластически деформированного материала. Под ним расположены зерна, претерпевшие срез, а затем — исходная структура сплава. Учитывая, что при алмазной обработке температура в зоне шлифования сравнительно невелика, ее влияние, очевидно, ограничено тонким поверхностным слоем, толщина которого не превышает размера одного зерна карбида. В некоторых местах распределенный слой отсутствует, так как удален из поверхностного слоя вместе с осколком раздробившегося зерна карбида.

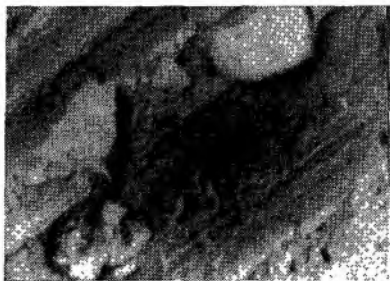


Рис. 59. Участок поверхности твердого сплава ВК6 после алмазного шлифования, $\times 5000$.

С помощью специальной методики была произведена ко-

личественная обработка информации, получаемой с электронных снимков обработанной поверхности. Между суммарной площадью вырывов и условиями шлифования прослеживается определенная связь.

Описанная схема строения поверхностного слоя соответствует механизму работы алмазного зерна и объясняет тот факт, что при оптимальных условиях алмазной обработки грубые дефекты в поверхностном слое отсутствуют, а материал, из которого он сформирован, по своим физико-механическим свойствам приближается к исходному.

ШЕРОХОВАТОСТЬ И ОСТРОТА РЕЖУЩИХ КРОМОК ИНСТРУМЕНТА

Основными критериями оценки качества микрогеометрии режущей части инструмента, наряду с шероховатостью рабочих поверхностей, являются шероховатость и острота режущих кромок. В связи с этим необходимо при оптимизации условий финишной обработки инструментов не только предусматривать получение требуемой шероховатости рабочих поверхностей, как это принято в настоящее время в большинстве руководящих материалов, но и учитывать возможность обеспечения необходимой шероховатости и остроты режущих кромок.

Существующие аналитические методы определения микронеровностей режущей кромки инструмента не отражают действительного механизма ее образования, так как они основаны на предположении формирования неровностей кромки за счет пересечения на ней выступов и впадин передней и задней рабочих поверхностей.

При такой схеме образования неровностей режущей кромки ее шероховатость строго геометрически связана с шероховатостью передней и задней поверхностей и должна находиться на одном и том же уровне для инструментов, имеющих угол заострения $\beta = 70...100^\circ$. Из этой схемы следует неправильный вывод о том, что для получения необходимой шероховатости режущей кромки достаточно улучшать шероховатость передней и задней поверхностей инструмента.

В результате исследований было установлено, что при алмазной и абразивной обработке режущей части инструментов шероховатость кромки и ее образующих поверхностей может различаться в 6—10 раз и улучшение микрогео-

метрии режущей кромки не может быть достигнуто только за счет уменьшения микронеровностей передней и задней поверхностей инструмента.

Исследования механизмов образования режущей кромки позволили установить, что режущая кромка твердосплавных, минералокерамических и в некоторых случаях быстрорежущих инструментов формируется за счет сколов как в случае резания единичным зерном, так и при обработке алмазными и абразивными кругами. Поэтому не может быть непосредственной геометрической связи между микронеровностями режущей кромки и ее образующих поверхностей [83].

Из установленного механизма образования режущей кромки следует, что основными параметрами, определяющими величину сколов и микрогеометрию кромки, являются силы резания и направление их приложения, физико-механические свойства инструментального материала в исходном состоянии и их изменение в процессе обработки, а также геометрические параметры режущего клина инструмента, определяющие его прочность. На величину сколов режущей кромки существенное влияние оказывает тепловая напряженность в зоне резания и связанные с ней структурные превращения в прикромочных участках. Влияние этого фактора особенно существенно при обработке быстрорежущих инструментов.

В этом случае повышенный нагрев режущей кромки вследствие небольшого ее объема и ухудшенного теплоотвода в металл может привести к значительным структурным превращениям и изменению исходных физико-механических свойств поверхности материала. Последнее приводит к тому, что даже у быстрорежущих сталей с высокой механической прочностью режущая кромка, состоящая из хрупкого аустенита вторичной закалки, легко скалывается. В то же время, при резании единичным алмазным зерном, когда практически кромка не подвержена фазовым превращениям и ее сколы незначительны, неровность на кромке образуется как след риски, нанесенный алмазным зерном на поверхность. При шлифовании быстрорежущих сталей кругами величина сколов режущей кромки определяется интенсивностью фазовых превращений. Поэтому наибольшие сколы режущей кромки образуются электрокорундовым кругом. Меньшая величина сколов наблюдается при доводке мелкозернистым кругом карбида кремния

зеленого на бакелитовой связке и еще меньшая — при доводке мелкозернистым алмазным кругом.

Даже при «мягких» режимах абразивного шлифования быстрорежущих сталей образуется слой вторичной закалки глубиной до 0,05 мм. Этот слой обладает более высокой твердостью, чем исходный материал, и весьма хрупок. Он легко выкрашивается при шлифовании, образуя большие сколы и весьма шероховатое лезвие. При оптимальных условиях алмазной обработки фазовые превращения в поверхностном слое практически отсутствуют и поэтому сколы режущей кромки незначительны.

В отличие от быстрорежущих сталей, твердые сплавы менее чувствительны к изменениям условий обработки с точки зрения фазовых превращений. Поэтому в процессе формирования режущей кромки определяющими должны быть сила резания и изменение исходных механических свойств.

Весьма существенную роль в образовании сколов режущей кромки могут играть пористость твердых сплавов и включения графита, ослабляющие ее прочность.

При изучении характера скола режущей кромки под микроскопом было установлено, что поверхность скола занимает в пространстве положение, близкое к перпендикулярному по отношению к биссектрисе угла заострения β , так как в этом случае обеспечивается наименьший момент сопротивления изгибающим нагрузкам. Поэтому на фотографиях, показывающих вид кромки сверху (рис. 60 и 61), хорошо видна ширина скола, которая существенно различается в зависимости от условий шлифования и может быть использована для оценки остроты режущей кромки. Обычно острота режущей кромки оценивается величиной ее радиуса округления. В действительности режущая кромка описывается сложной кривой, которая приближенно принимается в виде дуги окружности [14].

Притупление режущей кромки вдоль ее длины неравномерное [84]. Несмотря на это, считается возможным без особо большой погрешности принимать кривую этого притупления с постоянным радиусом округления ρ . Но при геометрической схеме образования шероховатости лезвия у режущей кромки не может быть радиуса округления [83].

Можно предположить, что при абразивной заточке и доводке инструмента, когда имеет место большой износ круга, происходит сильное заваливание режущей кромки.

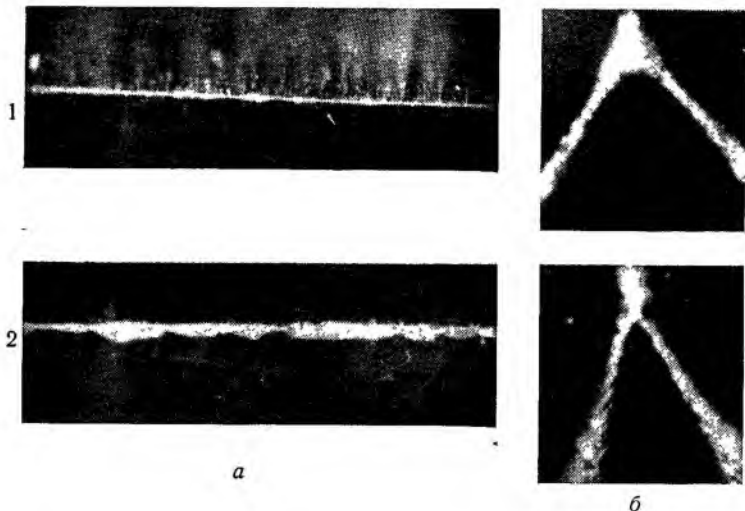


Рис. 60. Изменение ширины скола (а) и остроты (б) режущей кромки в зависимости от угла заострения β твердого сплава Т30К4 при шлифовании кругом КЗ — 25 — МЗК ($v_{кр} = 8$ м/с, $S_{пр} = 2,0$ м/мин, $S_{п} = 0,02$ мм/дв. ход):
1 — $\beta = 100^\circ$; 2 — $\beta = 70^\circ$.

Аналогичное явление наблюдается при доводке инструмента пастой карбида бора.

Поскольку алмазный круг обладает исключительно высокой износостойкостью, заоваливание режущей кромки инструмента выпадающими частицами зерен практически исключено. Поэтому при алмазной обработке инструмента острота режущей кромки будет определяться только величиной ее сколов под действием сил резания. Остроту режущей кромки в этом случае целесообразно характеризовать или шириной ее скола, или радиусом вписанной окружности, касательной к передней и задней поверхностям инструмента и поверхности скола.

В ряде случаев радиус округления представляют как окружность, огибающую шероховатость округленной поверхности режущей кромки (рис. 62, а) [85]. Появление округления режущей кромки объясняют мелкими выкрашиваниями ее вследствие ударов при заточке выступающими абразивными зернами. Однако непонятна природа возникновения микронеровностей, поскольку на рисунке представлены продольные микронеровности в сечении, пер-

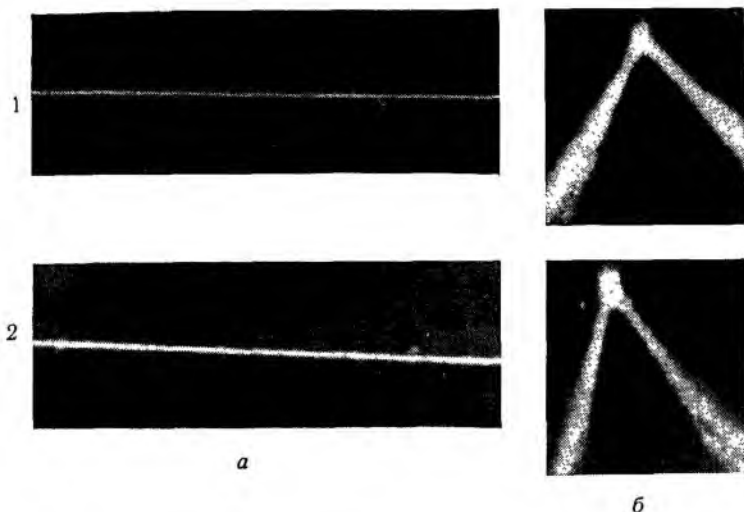


Рис. 61. Изменение ширины скола (а) и остроты (б) режущей кромки в зависимости от угла заострения β твердого сплава Т30К4 при шлифовании кругом АСО 160/125 — 100% — Б1 ($v_{кр} = 30$ м/с, $S_{пр} = 1,0$ м/мин: $S_{п} = 0,01$ мм/дв. ход):
1 — $\beta = 100^\circ$; 2 — $\beta = 70^\circ$.

пендикулярном к режущей кромке. Кроме того, не обоснованы рассуждения относительно неизменности микронеровностей округленной поверхности режущей кромки при уменьшении угла β .

Из рис. 62, а следует, что первоначальные неровности на режущей кромке для угла заострения $\beta = 90^\circ$ не изме-

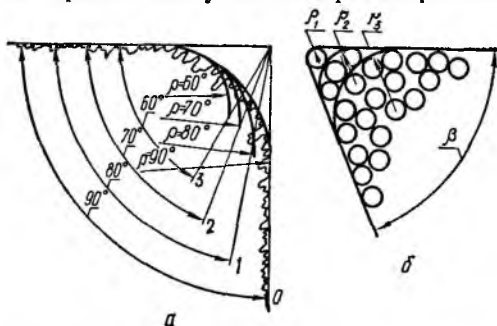


Рис. 62. Схема образования радиуса округления режущей кромки по данным различных авторов:
а — [85]; б — [68].

няются при последующей заточке со стороны задней поверхности до угла $\beta = 80, 70$ и 60° . Представляет интерес гипотеза образования радиуса округления режущих кромок твердосплавного инструмента, согласно которой под действием режущих элементов абразивного или алмазного круга зерна твердого сплава, находящиеся на острие режущей кромки, отделяются от основной массы твердого сплава [68]. Их отделение происходит сравнительно легко, потому что связь между зернами на острие и внутренними зернами сплава ограничивается углом заострения β (рис. 62, б). Из рисунка видно, что зерна, лежащие на дуге радиусом ρ_1 , связаны с соседними зернами менее прочно, чем зерна, лежащие на дуге радиусом ρ_2 , а последние связаны со сплавом менее прочно, чем зерна, лежащие на дуге радиусом ρ_3 , и т. д. Зерна карбидов отделяются от острия до тех пор, пока не образуется поверхность, на которой связь между зернами достаточна, чтобы противостоять воздействию абразивного или алмазного круга.

Однако следует иметь в виду, что при алмазной обработке передней или задней поверхностей инструмента зерна круга не смогут непосредственно контактировать с карбидными зернами, расположенными вне зоны резания. Отделение карбидных зерен в этом случае может произойти лишь путем сдвига, излома или отрыва целой монолитной их группы.

Количественное определение величины радиуса округления режущей кромки ρ во всех приведенных исследованиях выполнялось с помощью метода светового сечения. Поэтому увеличение ρ с ростом угла β , отмечаемое при этих исследованиях, можно объяснить погрешностями самого метода измерения.

Как правило, у вершины режущей кромки при ее рассмотрении в двойном микроскопе МИС-11 наблюдается сильно размытый световой ореол (см. рис. 60, б и 61, б). Вершина в месте пересечения передней и задней поверхностей с плоскостью скола сливается с профилем вписанной окружности и воспринимается как радиус. Поэтому радиус округления режущей кромки определяется как дуга сопряжения сторон угла β по внутреннему более четкому очертанию светового контура. Это приводит к тому, что при малых значениях угла β его стороны сопрягаются дугой малого радиуса, при увеличении β соответственно возрастает ρ .

На фотографиях поперечного шлифа режущей кромки наглядно видно, что вершина кромки представляет собой

линию, расположенную почти перпендикулярно к биссектрисе угла β . Более точно остроту этой кромки можно характеризовать шириной скола a ; для анализа закономерности измерения ширины скола a с увеличением угла β можно использовать радиус вписанной окружности ρ , который связан с величинами a и β зависимостью $\rho = a/2 \cdot \operatorname{tg}(45^\circ - \beta/4)$.

На рис. 63 схематично представлена вершина режущей кромки, имеющая скол. На этом же рисунке представлен график зависимости радиуса вписанной окружности ρ от ширины скола a при различных углах β . Между ρ и a существует линейная зависимость. С увеличением ширины скола a и угла β радиус вписанной окружности возрастает, причем более интенсивно при большем значении угла β . Но с увеличением угла β вершина режущей кромки упрочняется, что должно привести к

уменьшению ее сколов, а следовательно, к изменению ρ . В общем случае могут быть три характера изменения ρ : при увеличении угла β радиус вписанной окружности может возрастать, уменьшаться или оставаться постоянным.

Из графика (рис. 63) следует, что случаю $\rho = \text{const}$ при изменении угла β от 70° до 100° соответствует любая горизонтальная прямая, параллельная оси абсцисс (прямая $b_{1,2 \dots n} - C_{1,2 \dots n}$). При $\rho = \text{const}$ с увеличением угла β от 70° до 100° ширина скола a должна обязательно уменьшаться с определенной интенсивностью, постоянной для любого значения ρ .

Интенсивность уменьшения a в этом случае можно характеризовать отношением

$$K = \frac{a_{70^\circ}}{a_{100^\circ}} = \frac{\operatorname{tg}(45^\circ - 70^\circ/4)}{\operatorname{tg}(45^\circ - 100^\circ/4)} = 1,43.$$

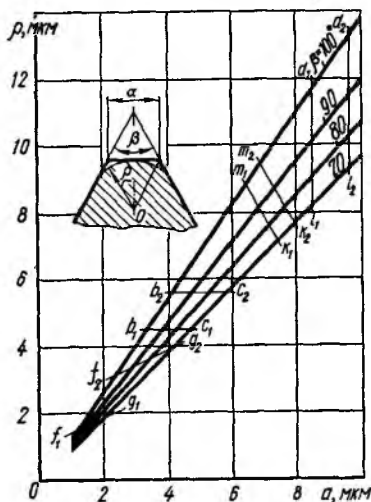


Рис. 63. Зависимость радиуса округления режущей кромки от ширины скола a .

Для соблюдения условия $\rho = \text{const}$ при увеличении угла β от 70° до 100° ширина скола должна уменьшаться в 1,43 раза.

Если предположить, что с увеличением угла β от 70° до 100° ширина скола a остается постоянной, то, исходя из графика и формулы, ρ должно увеличиваться. На графике этому соответствует любая вертикальная прямая, параллельная оси ординат (прямая $d_{1,2,\dots,n} - l_{1,2,\dots,n}$). На практике такой случай вполне возможен, так как ширина скола a определяет момент сопротивления изгибающим нагрузкам, под действием которых могут образовываться сколы режущей кромки. Вполне очевидно, что если прямые $d_{1,2,\dots,n} - l_{1,2,\dots,n}$ будут составлять с горизонтальной осью не прямой, а любой отрицательный угол, то характер изменения ρ с увеличением угла β останется таким же, изменится только интенсивность роста радиуса округления ρ . Этому соответствуют прямые $k_{1,2,\dots,n} - m_{1,2,\dots,n}$.

Наконец возможен и такой случай, когда с увеличением угла β ширина скола a уменьшается настолько интенсивно, что это приводит к уменьшению ρ . На графике это представлено прямыми $f_{1,2,\dots,n} - g_{1,2,\dots,n}$, которые образуют положительный угол с осью абсцисс.

Из сказанного нетрудно убедиться, что изменения ρ полностью характеризуются величинами a и β . Абсолютные значения указанных величин, а также интенсивность их изменения зависят от многих конкретных факторов, и поэтому могут быть установлены только экспериментально для определенных условий.

Теоретически, на основании изложенного, возможно установить только предельные значения рассмотренных конкретных величин, определяющих характер изменения ρ . Эти значения для углов в интервале от 70° до 100° представлены на рис. 63.

Из графика видно, что при значении $K = a_{70^\circ}/a_{100^\circ} = 1,43$ радиус округления ρ при увеличении β от 70° до 100° будет оставаться неизменным; при $K > 1,43$ значение будет уменьшаться, а при $K < 1,43$, наоборот, увеличиваться. Вероятно, в реальных условиях выполнения процессов заточки или доводки инструментов возможны все три рассмотренных случая.

С увеличением угла β ширина скола кромки уменьшается, а радиус округления ее в световом сечении во всех случаях возрастает (см. рис. 60, 61).

При расчетном способе определения радиуса округления по измеренной ширине скола a значения ρ у более хрупких марок твердого сплава с увеличением угла β возрастают, а у более прочных — уменьшаются (рис. 64). Не исключена возможность, что некоторые инструментальные материалы могут занимать промежуточное положение, т. е. у них с увеличением угла β радиус округления будет оставаться неизменным, а ширина скола a уменьшится.

Оценка остроты режущей кромки шириной скола a возможна только для случаев формирования режущей кромки путем сколов и в том случае, когда метод заточки или доводки исключает образование на ней завалов. В процессе эксплуатации инструментов режущая кромка может заваливаться сходящей стружкой. Для этих случаев оценку остроты режущей кромки целесообразнее про-

изводить по профилограммам вершины режущей кромки в поперечном сечении, выполненном на профилографе-профилометре завода «Калибр» по определенной методике [83].

Сколы режущей кромки, образующиеся при заточке инструмента, обуславливают закономерность формирования ее шероховатости и остроты. При этом острота кромки определяется в основном абсолютной величиной скола, а шероховатость — взаимным наложением отдельных микросколов, образованных каждым режущим алмазным зерном. Поэтому варьирование одного и того же параметра процесса шлифования может по-разному влиять на закономерность изменения шероховатости и остроты режущей кромки.

Так, увеличение зернистости алмазного круга от АСМ 20/14 до АСО 160/125 ухудшает шероховатость режущей кромки для сплава ВК4 от $R_a = 0,4$ мкм до $R_a = 1,6$ мкм и для сплава Т30К4 от $R_a = 0,32$ мкм до $R_a = 1,25$ мкм. Зависимость остроты режущей кромки от зернистости круга имеет экстремальный характер. Минимальная острота режущей кромки наблюдается при шлифовании кругом

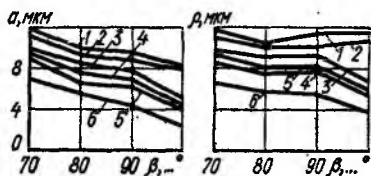


Рис. 64. Влияние угла заострения β на ширину скола a и радиус ρ округления режущей кромки при обработке различных инструментальных материалов кругом АСО 50/40 — 100% — Б1 ($v_{кр} = 30$ м/с, $S_{пр} = 1,0$ м/мин, $S_{п} = 0,01$ мм/дв.

ход):

1 — ВК2; 2 — Т5К10; 3 — ВК8; 4 — Т15К6; 5 — ВК4; 6 — Т30К4.

зернистостью АСО 100/80 и ухудшается с увеличением или уменьшением зернистости, причем более интенсивно при увеличении. При шлифовании кругом зернистостью АСО 100/80 сила резания минимальна, вследствие чего абсолютная величина скола режущей кромки уменьшается и ее острота улучшается (рис. 65).

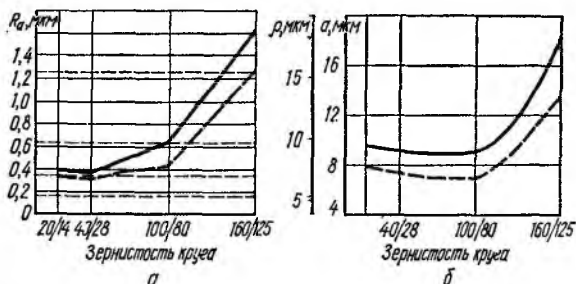


Рис. 65. Влияние зернистости круга на шероховатость (а) и остроту (б) режущей кромки при обработке сплава ВК4 (сплошная линия) и Т30К4 (штриховая линия) кругами с алмазами марки АСО 100%-ной концентрации на связке Б1 ($v_{кр} = 30$ м/с, $S_{пр} = 1,0$ м/мин, $S_{п} = 0,01$ мм/дв. ход, $\beta = 70^\circ$).

С ростом зернистости круга число работающих зерен уменьшается и, следовательно, увеличивается сечение единичных срезов, а также возрастает сила резания, приходящаяся на каждое зерно. Это увеличивает неравномерность сколов режущей кромки и ее шероховатость даже при минимальной абсолютной величине скола при шлифовании кругом зернистостью АСО 100/80.

С увеличением концентрации алмазов в круге от 25 до 200% шероховатость и острота режущей кромки улучшается (рис. 66). Наиболее интенсивное улучшение микрогеометрии режущей кромки наблюдается при увеличении концентрации алмазов в круге от 25 до 100%.

Аналогичным образом изменяется сила резания при увеличении концентрации алмазного круга. Следовательно, характер изменения микрогеометрии режущей кромки коррелирует с закономерностью изменения силы резания при шлифовании. Абсолютное значение величины скола режущей кромки, помимо действующих на нее сил резания, обуславливается многими другими факторами: состоянием рабочей поверхности круга, зависимостью физико-механиче-

ских свойств обрабатываемого материала от фактической температуры нагрева зоны скола, которая, в свою очередь, зависит как от свойств обрабатываемого материала, так и от характеристики алмазного круга. Так, алмазные круги малой зернистости вызывают более высокие силы резания в сравнении с кругами средней зернистости, но при этом в зоне резания возникают меньшие температуры, что уменьшает снижение прочности режущей кромки.

Величина сколов и характер их взаимного наложения

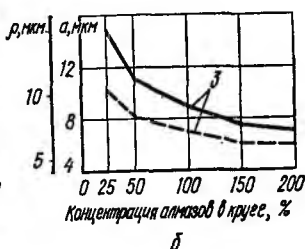
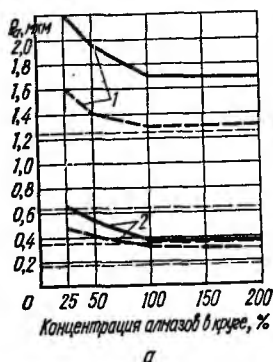


Рис. 66. Влияние концентрации алмазов в круге на шероховатость (а) и остроту (б) режущей кромки при обработке сплавов различными кругами ($v_{кр} = 30$ м/с,

$S_{пр} = 1,0$ м/мин, $S_{п} = 0,01$ мм/дв. ход, $\beta = 70^\circ$):

1 — АСО 160/125 — Б1; 2 — АСО 40/28 — Б1; 3 — АСО 100/80 — Б1; — — — — ВК4; — — — — Т30К4.

зависят от степени влияния различных факторов. Так, при образовании у алмазных зерен площадок износа наряду с ростом сил резания увеличивается площадь контакта между обрабатываемой и рабочей поверхностями круга. Интенсивность роста удельных нагрузок на режущую кромку будет снижаться. Этим можно объяснить сравнительно небольшое различие в ширине сколов режущей кромки и ее шероховатости при шлифовании кругами на органической, керамической и металлической связках, армированных алмазами различной прочности (рис. 67). В то же время силы резания у кругов этих характеристик существенно отличаются (см. рис. 36).

С увеличением продолжительности шлифования возрастает затупление алмазных зерен, повышается абсолютная величина сколов режущей кромки, но они становятся более равномерными, в результате чего снижается шероховатость

кромки. Стабилизация затупления алмазных зерен приводит к образованию постоянной микрогеометрии режущей кромки. Этот период наступает через 30—60 мин работы круга после его правки и определяется маркой алмазного зерна и типом связки. У кругов на бакелитовой связке с алмазами марки АСО сколы и микрогеометрия режущей кромки незначительно изменяются с ростом продолжительности

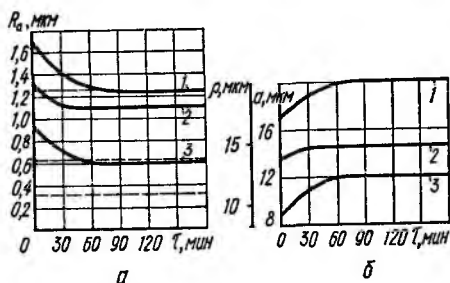


Рис. 67. Влияние продолжительности работы круга на шероховатость (а) и остроту (б) режущей кромки при обработке сплава Т30К4 кругами 200%-ной концентрации ($v_{кр} = 30 \text{ м/с}$, $S_{пр} = 1,0 \text{ м/мин}$, $S_{п} = 0,01 \text{ мм/дв. ход}$, $\beta = 70^\circ$): 1 — АСП 250/200—К1; 2 — АСО—160/125—Б1; 3 — АСВ 100/80—М1.

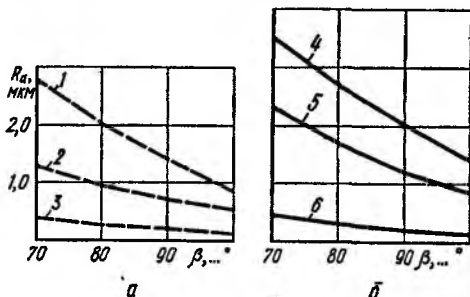
шлифования. Наибольшие изменения наблюдаются у кругов на металлической связке М1, армированных алмазными зернами марки АСВ.

Графики изменения микрогеометрии режущей кромки от продолжительности работы алмазного круга показывают отсутствие функциональной взаимосвязи между ее шероховатостью и остротой (рис 67). Острота режущей кромки обусловлена, прежде всего, абсолютной величиной ее скола, а шероховатость — взаимным наложением отдельных микросколов. Поэтому один и тот же фактор — затупление алмазных зерен — приводит к уменьшению шероховатости режущей кромки при образовании больших по величине, но равномерных по высоте сколов; при этом увеличение ширины сколов кромки ухудшает ее остроту.

Преимущество алмазной обработки режущей части инструментов в сравнении с абразивной наиболее наглядно проявляется при сравнении образующейся микрогеометрии режущей кромки (рис 68). Сравнение шероховатости режущей кромки у быстрорежущих инструментов, обработанных при оптимальных условиях алмазными и абразивными кругами, показывает, что после алмазной обработки шероховатость кромки в 4—6 раз меньше, чем при доводке мелкозернистым кругом марки КЗ. В то же время шероховатость рабочих поверхностей, образующих кромку, при алмазной обработке меньше всего на 30%. Шероховатость режущей

кромки после алмазной обработки в 6—8 раз меньше, в сравнении с чистой заточкой электрокорундовым кругом, и незначительно изменяется при увеличении угла от 70 до 100°. Аналогичная закономерность наблюдается при алмаз-

Рис. 68. Шероховатость режущей кромки при шлифовании сплава Т30К4 (а) кругами К325МКЗ (1) с $v_{кр} = 8$ м/с, $S_{пр} = 2,0$ м/мин, $S_{п} = 0,02$ мм/дв. ход; К36СМ1Б (2) с $v_{кр} = 25$ м/с, $S_{пр} = 1,0$ м/мин, $S_{п} = 0,01$ мм/дв. ход; АСО 50/40 — 100% — Б1 (3) с $v_{кр} = 30$ м/с, $S_{пр} = 1,0$ м/мин, $S_{п} = 0,01$ мм/дв. ход и стали Р18 (б) кругами ЭБ25С1К (1) с $v_{кр} = 30$ м/с, $S_{пр} = 3,0$ м/мин, $S_{п} = 0,04$ мм/дв. ход; К36СМ1Б (2) с $v_{кр} = 25$ м/с, $S_{пр} = 1,5$ м/мин, $S_{п} = 0,005$ мм/дв. ход; АСО 50/40 — 100% — Б1 (3) с $v_{кр} = 16$ м/с, $S_{пр} = 0,5$ м/мин, $S_{п} = 0,005$ мм/дв. ход.



ной и абразивной обработке твердосплавных инструментов (рис. 68). Увеличение угла заострения режущей кромки от 70 до 100° уменьшает шероховатость при алмазной обработке примерно в 2 раза и значительно улучшает ее остроту (рис. 61, 68). Это обусловлено уменьшением величины сколов и их равномерности вследствие упрочнения режущего клина.



Рис. 69. Влияние положения пластинки относительно круга (а) на шероховатость режущей кромки (б) при обработке различных сплавов кругом АСО 50/40 — 100% — Б1 ($v_{кр} = 30$ м/с, $S_{пр} = 1,0$ м/мин, $S_{п} = 0,01$ мм/дв. ход, $\beta = 70^\circ$, без охлаждения):

— — ВК4; — — — — Т30К4.

Рис. 69. Влияние положения пластинки относительно круга (а) на шероховатость режущей кромки (б) при обработке различных сплавов кругом АСО 50/40 — 100% — Б1 ($v_{кр} = 30$ м/с, $S_{пр} = 1,0$ м/мин, $S_{п} = 0,01$ мм/дв. ход, $\beta = 70^\circ$, без охлаждения):

Рис. 69. Влияние положения пластинки относительно круга (а) на шероховатость режущей кромки (б) при обработке различных сплавов кругом АСО 50/40 — 100% — Б1 ($v_{кр} = 30$ м/с, $S_{пр} = 1,0$ м/мин, $S_{п} = 0,01$ мм/дв. ход, $\beta = 70^\circ$, без охлаждения):

сплавных инструментов приводят к образованию значительных сколов, в результате чего значение ρ достигает 20—30 мкм.

В зависимости от положения пластинки относительно рабочей поверхности круга шероховатость режущей кромки уменьшается примерно в два раза (рис. 69) не за счет направления штрихов на передней и задней поверхностях

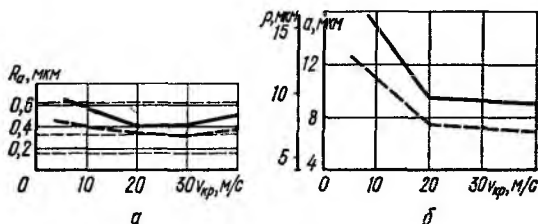


Рис. 70. Влияние скорости резания на шероховатость (а) и остроту (б) режущей кромки при обработке сплавов различными кругами 100%-ной концентрации на связке Б1 ($S_{пр} = 1,0$ м/мин, $S_n = 0,01$ мм/дв. ход, $\beta = 70^\circ$) без охлаждения:

а — АСО — 50/40; б — АСО — 100/80; — — — ВК4; — — — Т30К4.

инструмента и их взаимного расположения, а за счет уменьшения площади поперечного сечения единичного среза, силы резания и скола от каждого режущего алмазного зерна [84]. Влияние параметров режима шлифования на микрогеометрию обусловлено, прежде всего, характером измене-

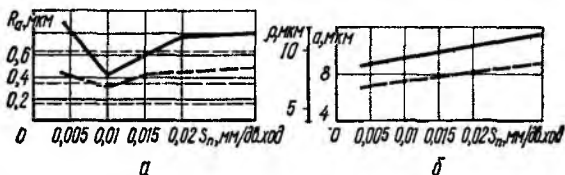


Рис. 71. Влияние поперечной подачи на шероховатость (а) и остроту (б) режущей кромки при обработке сплавов различными кругами 100%-ной концентрации на связке Б1 ($v_{кр} = 30$ м/с, $S_{пр} = 1,0$ м/мин, $\beta = 70^\circ$):

а — АСО 50/40; б — АСО 100/80; — — — ВК4; — — — Т30К4.

ния единичных срезов. Однако при этом возникают некоторые дополнительные явления. Наиболее существенное влияние на шероховатость режущей кромки оказывает скорость резания (рис. 70, а). С ростом скорости резания уменьшается сечение срезов, производимых каждым работающим зерном. Это снижает силы резания как отдельных зерен, так

и суммарную силу резания, в результате чего уменьшаются сколы режущей кромки, а шероховатость и острота ее улучшаются. Однако с увеличением скорости резания возрастает ударное воздействие алмазных зерен на режущую кромку, что увеличивает неравномерность микросколов. Поэтому шероховатость режущей кромки снижается в меньшей степени в сравнении с шероховатостью поверхности, и при скорости резания свыше 30 м/с она несколько увеличивается.

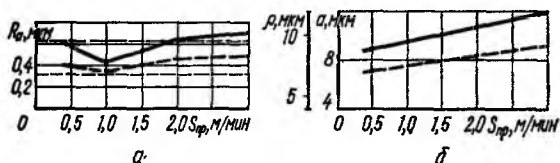


Рис. 72. Влияние продольной подачи на шероховатость (а) и остроту (б) режущей кромки при обработке сплавов различными кругами 100%-ной концентрации на связке Б1 ($v_{кр} = 30$ м/с, $S_{II} = 0,01$ мм/дв. ход, $\beta = 70^\circ$):
а — АСО 50/40; б — АСО 100/80; — — — — — ВК4; — — — — — Т30К4.

Влияние этих микросколов труднее фиксировать при измерении остроты режущей кромки и поэтому она остается практически неизменной в диапазоне скоростей 20—40 м/с (рис. 70, б). Зависимость шероховатости режущей кромки от поперечной и продольной подач носит также экстремальный характер (рис. 71 и 72). При малых значениях подач отдельные выступающие режущие зерна образуют на кромке более глубокие сколы, при этом неравномерность этих сколов увеличивается. Увеличение подач приводит к росту суммарной силы резания и сколов кромки; при этом острота кромки ухудшается. Однако повышение абсолютной величины сколов режущей кромки при определенных значениях поперечной и продольной подач приводит к равномерности сколов, что уменьшает шероховатость кромки, а при дальнейшем росте подач — увеличивает ее.

Как видно из приведенных графиков (рис. 70—72), при различных условиях алмазной обработки наименьшая шероховатость и лучшая острота режущей кромки наблюдаются у сплава Т30К4, хотя при резании этого сплава единичным алмазным зерном на кромке образуются наибольшие сколы [83]. Это обусловлено влиянием прочности инструментального материала. При резании единичным

зерном прикромочный участок не нагревается и величина скола при сопоставимых условиях резания определяется исходной прочностью инструментального материала. При температуре, возникающей в зоне шлифования, прочность у твердого сплава ТЗ0К4 выше, чем у всех остальных материалов, что снижает величину сколов кромки. С ростом температуры уменьшается различие в прочности твердых сплавов. Поэтому при увеличении скорости шлифования значения шеро-

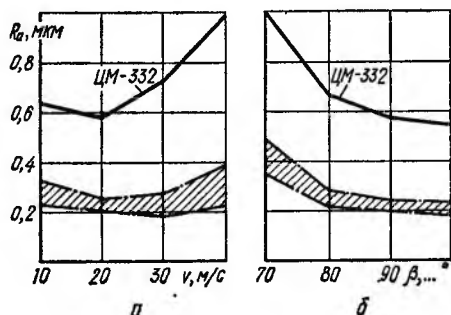


Рис. 73. Шероховатость режущей кромки при шлифовании кругом АСО 50/40 — 100% — Б1 ($S_{\text{пр}} = 1,0$ м/мин, $S_{\text{п}} = 0,01$ мм/дв. ход) инструментальных материалов ВК2, Т5К10, ВК8, ВК4, Т15К6, ТЗ0К4 (заштрихованная зона) и минералокерамики ЦМ-332:
а — $\beta = 90^\circ$; б — $v_{\text{кр}} = 20$ м/с.

ховатости режущей кромки при обработке разных марок твердых сплавов примерно одинаковы. Исключением является минералокерамика ЦМ-332, у которой при всех условиях шлифования образуется наиболее шероховатая режущая кромка (рис. 73).

Таким образом, варьируя различными технологическими параметрами процесса шлифования при алмазной обработке режущей части инструмента, можно в широком диапазоне изменять микрогеометрию рабочих поверхностей и режущих кромок: шероховатость поверхностей в пределах $R_a = 0,63 \dots 0,025$ μm , шероховатость режущих кромок — $R_a = 2,2 \dots 0,16$, радиус округления лезвия — 2—10 μm .

ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ШЛИФОВАНИИ МНОГОФАЗНЫХ МАТЕРИАЛОВ

При механической обработке поликристаллических материалов приповерхностный слой подвергается температурно-силовому воздействию, интенсивность которого уменьшается по мере удаления от обработанной поверхности. Со-

ответствующим образом снижается степень пластической деформации и структурные превращения. Такая неоднородность по глубине приводит к возникновению в приповерхностных слоях остаточной ориентированной деформации и соответственно ориентированных напряжений. Характер и величина формируемых остаточных напряжений обуславливаются воздействием силового и температурного факторов и определяются технологическими параметрами процесса механической обработки, а также физико-механическими свойствами обрабатываемого материала. При рассмотрении механизма появления остаточных макронапряжений в процессе механической обработки принято выделять три формирующих фактора: механический, тепловой и фазовый [45].

Механическая природа возникновения остаточных напряжений объясняется неоднородностью пластической деформации.

Как показали результаты исследования, при резании металлов имеет место неоднородность пластической деформации не только по глубине приповерхностного слоя, но и на поверхности вследствие возникновения зоны сжимающих напряжений впереди режущего клина и зоны растягивающих напряжений в результате воздействия изношенной задней поверхности режущего клина и отрыва стружки.

Сжимающие усилия впереди режущего клина вызывают деформацию сжатия в направлении действия этих усилий и деформацию растяжения в направлении, перпендикулярном к нему. При определенной величине напряжений в приповерхностном слое произойдет пластическое сжатие или растяжение различных зон. Поскольку пластически деформированные слои связаны с нижележащими слоями металла, в последних возникнут упругие деформации и уравновешивающие напряжения.

После снятия внешней нагрузки нижележащие упруго-деформированные слои будут восстанавливаться до исходного состояния, и в поверхностном слое возникнут соответствующие остаточные напряжения, величина и знак которых будут определяться пластической деформацией и степенью взаимодействия различных зон. По-видимому, этим можно объяснить возникновение как сжимающих, так и растягивающих остаточных напряжений при условиях шлифования различных материалов, исключаящих нагрев поверхностного слоя [50].

Для установления характера влияния механического фактора на формирование остаточных напряжений при алмазной обработке твердых сплавов производилась ручная притирка образцов алмазной пастой зернистостью в 1 мкм. Можно полагать, что при таких условиях обработки влияние теплового фактора на формирование остаточных напряжений весьма незначительно и им можно пренебречь.

Таблица 23

Значения $(\Delta d/d) \cdot 10^{-3}$ после притирки

Фаза	Марка сплава				
	ВК20	Т5К10	Т15К6	Т30К4	P18
WC	-2,2	-1,1	-1,2	-1,7	—
TiC	—	-0,75	-0,85	-1,1	—
Co	-3,8	—	—	—	—
α -фаза (мартенсит)	—	—	—	—	-5,6
Me ₆ C	—	—	—	—	-1,6

Рентгеноструктурное определение деформаций способом наклонных съемок показало, что в карбидной фазе сплава ВК20 после такой притирки возникают сжимающие остаточные напряжения величиной примерно 1,2 ГПа, в кобальте напряжения имеют тот же знак, но их величина значительно меньше — приблизительно 0,6 ГПа.

Распределение остаточной сжимающей деформации между фазами обусловлено их прочностными свойствами.

Как видно из табл. 23, деформация карбида вольфрама при обработке различных сплавов оказывается больше, чем карбида титана, а деформация кобальта больше, чем карбида вольфрама.

На основании анализа прочностных свойств различных фаз твердых сплавов можно прийти к выводу, что для WC и TiC величина сжимающей деформации определяется, прежде всего, их пластичностью. Более пластичные карбиды вольфрама претерпевают большую пластическую деформацию под действием временных напряжений, и поэтому остаточная деформация в них выше. Еще большую остаточную деформацию получает весьма пластичная кобальтовая фаза.

Модуль упругости карбида вольфрама более чем в два раза превышает модуль упругости карбида титана и значи-

тельно выше, чем у кобальта, что может свидетельствовать об отсутствии корреляционной связи между жесткостью фазовой составляющей твердого сплава и величиной их остаточной деформации. Различие в значениях модуля упругости карбидной и кобальтовой фаз обуславливает существенно меньшие значения остаточных напряжений в кобальте при более высокой остаточной деформации. Величина остаточных напряжений в кобальтовой фазе после алмазной обработки в определенной степени зависит от исходного состояния материала. Обычно до обработки в кобальтовой фазе имеют место незначительные растягивающие напряжения, а в карбидной — сжимающие.

Вместе с тем при определении величины остаточных напряжений брались значения модуля упругости для чистого кобальта. В действительности модуль упругости кобальтовой фазы в твердом сплаве может быть иным вследствие того, что в ней растворено несколько процентов карбида вольфрама. Однако значения модуля упругости отсутствуют для твердого раствора карбида вольфрама в кобальте.

Анализ приведенных результатов исследований позволяет сделать вывод, что под влиянием чисто механического фактора в поверхностном слое твердых сплавов при алмазной обработке формируются сжимающие остаточные напряжения. Эту особенность алмазной обработки, в отличие от обычной абразивной или обработки лезвийным инструментом, когда под влиянием механического фактора в определенных зонах формируются растягивающие остаточные напряжения, можно объяснить физико-механическими свойствами алмаза и кинематикой резания при доводке.

Растягивающие напряжения, формирующиеся в зоне контакта задней поверхности зерна, незначительны вследствие низкого коэффициента трения алмаза, а острые режущие кромки алмазных зерен обеспечивают чистый срез, существенно облегчая отделение стружки, что также снижает деформацию растяжения. В конечном итоге преобладающими являются сжимающие деформации, возникающие впереди алмазного зерна и ниже его плоскости.

Рентгенографированию подвергались образцы, доведенные алмазными порошками вручную, что обеспечивало хаотическое направление обработочных рисок и беспорядочное взаимное наложение пластически деформированных зон. Несомненно, принятая методика подготовки образцов не строго соответствует условиям шлифования, но она вполне

приемлема, если учесть поставленную задачу — установление характера влияния механического фактора на формирование остаточных напряжений.

В результате исследований установлено, что при всех условиях обработки твердых сплавов группы ВК имеет место неравенство главных напряжений σ_1 и σ_2 , расположенных соответственно поперек и вдоль направления шлифования, причем по абсолютной величине σ_1 всегда больше σ_2 . В то же время оба главных напряжения при всех условиях шлифования являются сжимающими.

Анизотропия остаточных напряжений является убедительным подтверждением механической природы их возникновения. Установлено, что максимальные значения главных напряжений ни при каких условиях шлифования не превышают предела текучести материала. При исследованиях алмазного шлифования указанных твердых сплавов остаточные напряжения не превышали 2,1 ГПа, что соответствует пределу текучести твердого сплава при температуре шлифования [27].

Различие в величине напряжений σ_1 и σ_2 может быть обусловлено соотношением тангенциальной и нормальной составляющих сил резания, в значительной степени определяющих характер пластической деформации вдоль и поперек направления шлифования.

Можно предположить, что под действием силы P_y в поверхностном слое будут возникать сжимающие деформации, которые уменьшаются за счет суммирования с растягивающими, возникающими вследствие воздействия задней поверхности алмазных зерен, перемещающихся со скоростью резания вдоль вектора скорости.

Сопоставляя интенсивность изменения составляющих силы резания P_z и P_y , а также соответствующих им коэффициентов шлифования $K_{\text{ш}} = P_z/P_y$, можно установить определенную корреляционную связь этих величин с характером изменения соотношения главных остаточных напряжений σ_1 и σ_2 . Так, для круга зернистостью АС 100/80 отношение P_z/P_y будет минимально (см. табл. 10, 11). Этой же зернистости соответствует минимальное отношение главных напряжений σ_2/σ_1 . Подобная закономерность наблюдается и при других условиях шлифования.

Особенно существенно проявляется различие главных напряжений при увеличении в твердом сплаве содержания кобальта.

Если у сплава ВК2 напряжения σ_1 и σ_2 незначительно различаются между собой, то при увеличении содержания кобальта до 4% резко возрастает напряжение σ_1 и в меньшей степени увеличивается напряжение σ_2 . При дальнейшем увеличении кобальта в сплаве до 20% остаточные напряжения σ_1 и σ_2 практически остаются неизменными.

Весьма широкое распространение получила гипотеза чисто термического происхождения остаточных макронапряжений при шлифовании. Основное содержание этой гипотезы сводится к следующему. При нагреве до высоких температур тонкий поверхностный слой расширяется, но этому препятствуют нижележащие холодные слои. В поверхностном слое возникают временные сжимающие напряжения, которые могут превысить предел упругого сопротивления, и материал на определенной глубине получит пластическую деформацию сжатия. Нижележащие и менее нагретые слои будут упруго деформированы, в них возникнут уравнивающие растягивающие напряжения. Поскольку все слои связаны между собой, то пластическая деформация будет протекать относительно легко только в направлении, перпендикулярном к нагретой поверхности. При охлаждении сильно нагретый поверхностный слой будет сжиматься более интенсивно, чем нижележащие слои, и поэтому вследствие полученного пластического сжатия он не сможет восстановить свое исходное состояние. В итоге в поверхностном слое возникнут растягивающие остаточные напряжения, а в нижележащих слоях — уравнивающие сжимающие напряжения.

Такой механизм остаточной ориентированной деформации хорошо отражает роль температурного градиента в формировании остаточных напряжений, но он не может быть исчерпывающим для гетерофазных материалов, состоящих из весьма твердой и жесткой фазы, охватываемой тонкими прослойками второй более мягкой и пластичной фазы. У таких материалов ориентированная деформация решетки в кристаллитах отдельных фаз оказывается неодинаковой из-за различия их механических и теплофизических свойств.

Наличие карбидной и кобальтовой фаз, резко различающихся между собой физико-механическими и теплофизическими свойствами, должно определенным образом отразиться на характере образования остаточных напряжений при шлифовании твердых сплавов.

В отличие от обычных материалов, при макрооднородном нагревании и последующем охлаждении твердого сплава могут возникнуть междофазные микронапряжения вследствие различия термических коэффициентов карбидной и кобальтовой фаз.

В поверхностном слое твердого сплава в процессе охлаждения после спекания устанавливается равновесное состояние за счет сжатия карбидных зерен и растяжения кобаль-

Таблица 24

Значения $(\Delta d/d) \cdot 10^{-3}$ после спекания

Фаза	Марка сплава					
	$\alpha, 10^{-6}/\text{град}$	ВК4	ВК20	Т5К10	Т15К6	Т30К4
WC	4,4—5,2	—0,3	—0,4	—0,5	—0,6	—0,5
TiC	7,4—8,3	—	—	+0,2	—0,1	—0,1
Co	14,2	—	+3,5	+1,2	—	—

та. Эти напряжения следует рассматривать как междофазные микронапряжения термического происхождения. Остаточные микронапряжения определялись после различных режимов спекания и охлаждения твердых сплавов, состав и структура которых изменялись в широких пределах. Величина возникающих напряжений зависит от размера карбидных зерен и содержания кобальта в сплаве. При увеличении кобальта в сплаве напряжения в карбидных зернах растут, а в кобальтовой фазе падают. Скорость охлаждения изменяет только величину остаточных напряжений, не внося принципиальных различий в их характер.

Абсолютные значения микронапряжений как в кобальтовой, так и в карбидной фазе не превышали десятых долей ГПа.

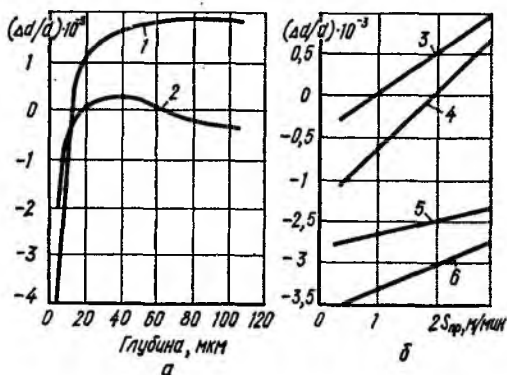
Эти результаты не полностью подтвердились исследованиями [45], выполненными на исходных образцах твердых сплавов, которые в дальнейшем подвергались алмазному шлифованию при различных условиях. Как видно из табл. 24, в кобальтовой фазе, имеющей наибольший термический коэффициент линейного расширения среди компонентов сплава, выявлена растягивающая остаточная междофазная деформация.

Если судить о влиянии содержания кобальта на величину остаточной деформации по данным для сплавов ВК20 и

Т5К10, то последняя снижается с увеличением кобальта. Рост остаточной деформации в карбидах с увеличением кобальта наблюдается только у сплавов группы ВК. У всех сплавов групп ВК и ТК в карбиде вольфрама, имеющем наименьший термический коэффициент линейного расширения, сохраняется сжимающая остаточная деформация. Знак деформации зависит от содержания карбида титана в твердом сплаве. При минимальном содержании карбида титана

Рис. 74. Распределение остаточной деформации решетки по глубине образца из сплава ВК20 (а) и зависимость остаточной деформации решетки карбидных фаз сплавов ВК4 и Т15К6 от продольной подачи (б):

1 — кобальт; 2, 4, 5 — карбид вольфрама; 3, 6 — карбид титана.



наблюдается деформация растяжения (в сплаве Т5К10), при его увеличении имеет место деформация сжатия (в сплавах Т15К6 и Т30К4).

Можно предположить, что при шлифовании твердого сплава в его поверхностном слое существенно изменится рассмотренный характер микродеформаций из-за неоднородности пластической деформации карбидной и кобальтовой фаз и различия их теплофизических свойств.

Под действием внешних нагрузок деформация в твердых сплавах локализуется в кобальтовых прослойках [27]. При этом пластическая деформация этих прослоек сильно заторможена вследствие их блокирования со стороны более жестких карбидных зерен. С увеличением содержания кобальта при постоянном размере карбидных зерен толщина кобальтовых прослоек возрастает, они становятся более пластичными и допускают более высокую степень деформации. Это подтверждается данными, полученными при измерении остаточной деформации кобальтовой фазы у сплавов Т5К10 и ВК20 после спекания (табл. 24). Более значительная остаточная деформация кобальтовой фазы в поверхностном слое образца наблюдается после шлифования сплава

ВК20 (рис. 74, а), что можно отнести за счет повышения термопластичности кобальтовой и карбидной фаз под влиянием теплового фактора.

После шлифования в карбидной фазе сплава ВК20, как и в кобальте, возникает сжимающая остаточная деформация. С ужесточением режима шлифования сжимающая остаточная деформация в карбидной фазе сплава ВК4 уменьшается вследствие увеличения влияния теплового фактора (рис. 74, б). Однако, несмотря на рост теплового фактора, основным в формировании остаточной деформации в карбидной фазе является механический фактор. Дополнительным подтверждением этого положения служит анизотропия остаточной деформации, направленной вдоль σ_2 (кривые 3, 5) и перпендикулярно σ_1 (кривые 4, 6) к рискам шлифования. Для сплавов группы ВК при изменении условий алмазного шлифования растягивающая остаточная деформация не наблюдалась. В то же время после шлифования сплава ВК15 кругом из карбида кремния зеленого возникают остаточные растягивающие напряжения, равные 0,8 ГПа, что свидетельствует о преобладающем влиянии термического фактора [54].

Основной вклад механического фактора в формировании остаточной деформации в отдельных фазах твердых сплавов группы ВК при алмазном шлифровании нельзя объяснить только особенностями физико-механических свойств алмаза. Существенную роль при этом играет температуропроводность обрабатываемого материала. При тех же условиях алмазного шлифования трехфазного сплава марки Т15К6, отличающегося от сплава ВК4 меньшей температуропроводностью, на формирование остаточной деформации в большей мере сказывается влияние температурного фактора. Поэтому при сравнительно мягких режимах шлифования в результате более сильного разогрева поверхностного слоя сплава Т15К6 сжимающая остаточная деформация по сравнению со сплавом ВК4 снижается интенсивнее. При жестких режимах шлифования и, следовательно, значительном разогреве поверхностного слоя в карбидных фазах TiC и WC возникает растягивающая деформация (рис. 74, б).

В зависимости от преобладающего влияния теплового или механического факторов на характер формирования остаточной деформации в большей или меньшей степени проявляется влияние физико-механических свойств отдельных фаз обрабатываемого материала. Более пластичная фаза

карбида вольфрама получает большую остаточную деформацию сжатия, когда преобладает механический фактор. Результирующая растягивающая деформация при доминирующем влиянии теплового фактора у карбида вольфрама меньше, чем у карбида титана, имеющего больший термический коэффициент линейного расширения (рис. 74, б, сплав Т15К6).

Следует отметить двойственный характер проявления остаточной деформации в многофазных материалах. Для гетерофазных материалов ориентированная деформация решетки в кристаллитах отдельных фаз оказывается неодинаковой из-за разницы механических и теплофизических свойств материалов способствует возникновению межфазных микронапряжений. Они возникают под совместным действием термического и механического факторов с преобладанием одного из них.

Об этом свидетельствуют снижение остаточной деформации сжатия с температурным ужесточением режимов шлифования, неравенство деформации вдоль σ_2 и перпендикулярно σ_1 рискам шлифования, а также зависимость величины остаточной деформации в карбидах вольфрама и титана от температурной напряженности процесса шлифования (рис. 74, б). В то же время исследование распределения этой деформации по глубине двухфазного сплава ВК20 показало, что сжимающая деформация в карбидной и кобальтовой фазах по мере удаления вглубь от обработанной поверхности сменяется растягивающей (рис. 74, а). Таким образом, весь слой оказывается макронапряженным. Это позволяет классифицировать наблюдаемую остаточную деформацию как макродеформацию.

Источником остаточных напряжений могут быть неравномерные фазовые превращения по глубине приповерхностного слоя или на шлифуемой поверхности. В результате фазовых превращений, протекающих при высоких температурах шлифования, изменяются удельные объемы. При образовании фаз с меньшим удельным объемом в поверхностном слое будут возникать растягивающие остаточные напряжения. Вполне очевидно, что влияние фазового фактора на формирование остаточного напряжения может проявляться у материалов, подверженных фазовым превращениям, при температурах, возникающих в зоне шлифования. Однако этот источник остаточных напряжений более характерен для инструментальных и других сталей, так как при алмазном

шлифовании твердых сплавов температура в зоне резания ниже той, при которой происходят структурные превращения в карбиде вольфрама или титана [77].

Остаточная деформация решетки мартенсита, аустенита и карбидов, входящих в состав быстрорежущей стали, существенно зависит от количества остаточного аустенита в поверхностном слое, характеризующего степень теплового воздействия на поверхность, а также от физико-механических и теплофизических свойств этих фаз.

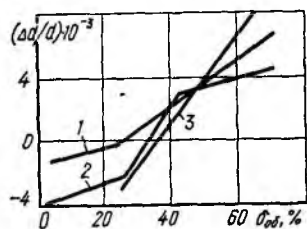


Рис. 75. Зависимость остаточной деформации решетки фаз стали Р18 от количества остаточного аустенита $\delta_{об}$:

1 — карбид Me_3C , 2 — γ -фаза (мартенсит); 3 — γ -фаза.

ся сравнительно невысоким тепловым воздействием, в поверхностном слое происходят незначительные структурные превращения. При этом наблюдается остаточная сжимающая деформация, которая во всех трех фазах по мере увеличения остаточного аустенита до 40% уменьшается.

При дальнейшем ужесточении условий шлифования и тепловой напряженности процесса количество остаточного аустенита в поверхностном слое увеличивается и соответственно этому растет остаточная деформация растяжения. Такая закономерность изменения величины и знака остаточной деформации обусловлена меньшим удельным объемом аустенитной фазы в сравнении с мартенситной.

Как и для твердых сплавов, в случае превалирования механического фактора макродеформация между отдельными фазами быстрорежущей стали распределяется в соответствии с их прочностными свойствами (рис. 75). Когда преобладает тепловой фактор, макродеформация между отдельными фазами должна распределяться в соответствии с их теплофизическими свойствами. Исходя из этого, остаточная растягивающая деформация мартенсита, имеющего более высокий коэффициент линейного расширения в сра-

С ростом количества остаточного аустенита в поверхностном слое стали Р18 меняется не только величина, но и знак остаточной деформации (рис. 75) [45]. Аналогичная зависимость между фазовыми превращениями и характером остаточной деформации подтверждалась и другими авторами. При условиях алмазного шлифования, характеризующихся

внении с карбидной фазой, должна быть больше, а в действительности оказывается меньшей. Это вызвано наложением сжимающих микродеформаций, возникающих вследствие фазовых превращений, что подтверждается моделированием процесса фазовых превращений, которое заключается в поверхностной закалке образцов ТВЧ [8].

Результирующая деформация аустенита является суммой растягивающих макро- и микродеформаций как вследствие уменьшения удельного объема при $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращении, так и вследствие наибольшего среди компонентов сплава коэффициента линейного расширения.

Приведенные результаты исследований указывают, что система остаточных деформаций (напряжений) во многофазных материалах не имеет строго макроскопического характера, т. е. однородного в больших объемах, а носит межфазный характер и зависит от содержания фаз и их свойств. Вклад механического, теплового и фазового факторов в формирование напряженного состояния поверхностного слоя обусловлен не только температурно-силовой напряженностью процесса алмазного шлифования, но и составом и свойствами фаз обрабатываемого материала.

Исследования закономерностей изменения остаточных напряжений и структурных превращений производились при широком варьировании как характеристик кругов, так и параметров режима шлифования [8, 54, 73].

Глава VII

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ИЗДЕЛИЙ, ОБРАБОТАННЫХ АЛМАЗНЫМИ КРУГАМИ

РАБОТОСПОСОБНОСТЬ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Эффективность работы режущего инструмента определяется качеством его режущей части — микрогеометрией рабочих поверхностей и кромок и также физико-механическими свойствами поверхностного слоя. Эти параметры формируются при заточке и доводке инструментов, поэтому всегда следует соблюдать оптимальные условия, обеспечивающие уровень качества. Указанные параметры качества режущей части инструмента влияют на его износостойкость и, следовательно, на точность, производительность и

себестоимость обработки. При чистовых операциях они оказывают решающее влияние на шероховатость обработанной поверхности и состояние тонкого поверхностного слоя, которые определяют эксплуатационные свойства деталей машин и механизмов.

Эффективным способом улучшения чистоты поверхности деталей, сформированной в процессе механической обработки, является улучшение микрогеометрии режущей части инструментов. По данным Б. Ф. Еремина и Л. Г. Семенихина, шероховатость поверхностей и режущих кромок инструмента всегда должна быть минимум в 2—4 раза меньше шероховатости обработанной поверхности. Это условие относится к протяжкам, разверткам, фасонным резцам, цилиндрическим и червячным фрезам, долбякам, резьбонарезному инструменту и т. д. Шероховатость обработанной поверхности в значительной мере зависит от шероховатости рабочих поверхностей и кромок даже для обычных токарных резцов при чистовых проходах.

Исследования П. Е. Дьяченко показали, что при больших подачах неровности поверхности, созданные неровностями лезвия, являются величинами второго порядка по сравнению с шероховатостью, зависящей от подачи и радиуса при вершине резца, поэтому при черновом точении могут не учитываться. При чистовом же точении или строгании широкими резцами на проход или врезанием, а также при обработке фасонными резцами в условиях малых пластических деформаций появление неровностей на обработанной поверхности в значительной мере обусловлено наличием микронеровностей на режущем лезвии. В условиях значительных пластических деформаций на появление неровностей влияют и другие факторы процесса резания.

Не менее существенная роль радиуса округления режущей кромки в процессе резания и формирования поверхностного слоя. От радиуса округления зависит образование неровностей обработанной поверхности, наклеп поверхностного слоя, величина возникающих сил, минимальная толщина стружки, которую можно срезать в условиях нормального процесса резания, что особенно существенно при выполнении отделочных операций. В связи с этим при изготовлении инструмента предъявляются жесткие требования к микрогеометрии и сохранению исходных физико-механических свойств в поверхностном слое режущей части. Существовавшие до последнего времени различные методы

финишной обработки инструментов или не обеспечивали необходимых параметров микрогеометрии и физико-механических свойств их режущей части, или же их применение на практике было связано с большими техническими труд-

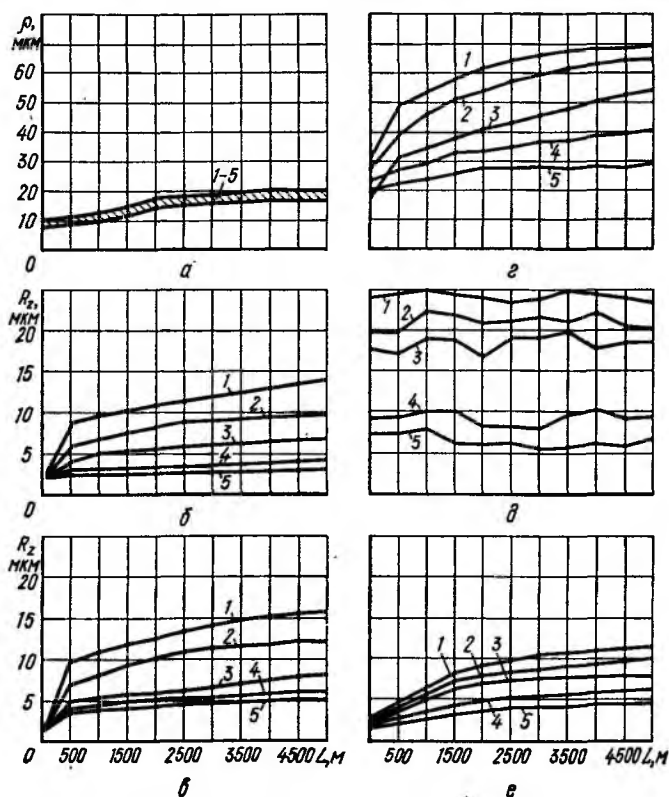


Рис. 76. Изменение радиуса округления кромки (а, г), шероховатости кромки (б, д) и ленточки (в, е) зуба развертки до алмазной (а, б, в) и после абразивной (г, д, е) заточки:
1 — ВК2; 2 — ВК3; 3 — ВК4; 4 — ВК6М; 5 — ВК8.

ностями и высокой трудоемкостью. Использование для этой цели алмазных кругов улучшает качество обработки режущей части инструмента при соответствующей производительности, что обуславливает значительное повышение работоспособности инструмента и, следовательно, более высокую производительность труда на металлорежущих станках.

В связи с этим представляет интерес изучение влияния условий заточки на характер и интенсивность износа режущей части инструментов в процессе их эксплуатации. Такие исследования производились на развертках, оснащенных твердыми сплавами ВК2, ВК3, ВК4, ВК6М, ВК8, при обработке чугунных закаленных гильз двигателя марки СМД, твердостью $HRC\ 40-45$ при следующих геометрических параметрах режущей части инструмента: $\gamma = 0^\circ$; $\alpha = \alpha_1 = 8^\circ$; $\lambda = 0^\circ$; $\varphi = 18^\circ$, $\varphi_0 = 2,5^\circ$; $f = 0,3\text{ мм}$, $l = 8\text{ мм}$. Гильзы обрабатывались при скорости резания $v = 12\text{ м/мин}$, подаче $S = 0,2\text{ мм/зуб}$ и глубине резания $t = 0,1\text{ мм}$. Заточка режущей части инструмента выполнялась кругами АЧК 125 $\times$ 10 $\times$ 3 — АСО 40/28 100% — Б1 и ЧК 125 $\times$ 10 — К316 — СМ1 — К при следующих режимах: $v_{кр} = 18\text{ м/с}$, $S_{пр} = 1\text{ м/мин}$, $S_{п} = 0,01\text{ мм/дв. ход}$.

Результаты измерений показали, что микрогеометрия калибрующей части зубьев развертки, особенно шероховатость и острота лезвия, после алмазной и абразивной заточки существенно отличаются друг от друга (рис. 76, 77).

В процессе работы инструмента вследствие износа наблюдается изменение исходной микрогеометрии его режущей части. Так, после алмазной обработки острота режущей кромки в процессе износа ухудшается незначительно независимо от марки твердого сплава и, достигнув величины $\rho = 20\text{ мкм}$, стабилизируется (рис. 76).

После абразивной обработки изменение радиуса округления режущей кромки зубьев разверток, оснащенных различными марками твердого сплава, неодинаково: после 5000 м пути резания у малокобальтовых сплавов с низкой прочностью ρ достигает 60—70 мкм, у более прочного сплава ВК8 $\rho = 30\text{ мкм}$. Это различие обусловлено, по-видимому, тем, что после абразивной заточки режущая кромка при износе формируется в основном за счет сколов (см. рис. 60). С увеличением содержания кобальта прочность сплава повышается, что приводит к снижению сколов режущей кромки и улучшению остроты лезвия. При этом шероховатость режущей кромки определяется величиной сколов и их неравномерностью. Характерно, что в процессе износа шероховатость режущей кромки изменяется незначительно (рис. 76). Периодические изменения шероховатости режущей кромки в процессе износа при абразивной заточке вызваны нестабильностью величины сколов режущей кромки в различные периоды их измерения. По мере увеличения

прочности твердого сплава шероховатость режущей кромки уменьшается.

После алмазной заточки на режущей кромке по мере ее износа отсутствуют крупные сколы, и только на уголке, в месте сопряжения заборной и калибрующей частей зуба,

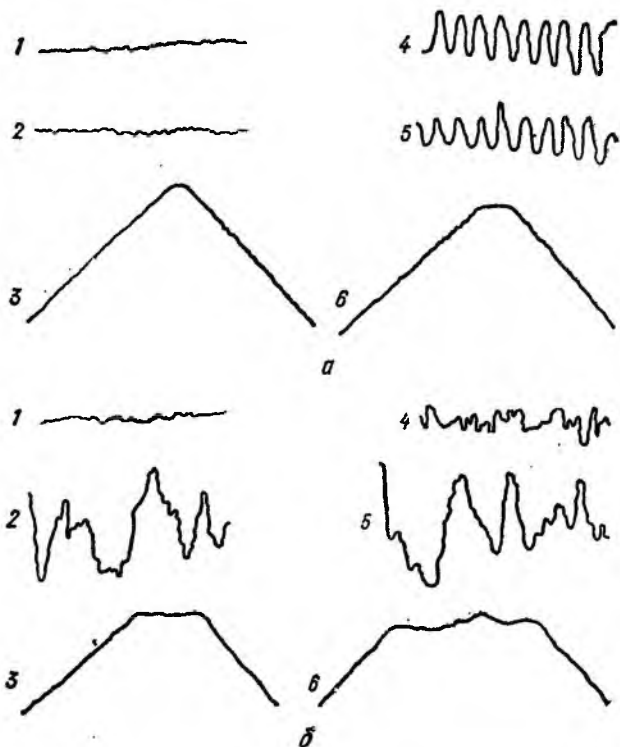


Рис. 77. Шероховатости ленточки (1, 4) и режущей кромки (2, 5), острота кромки (3, 6) после заточки сплава ВК4 алмазным (а) и сплава ВК2 абразивным (б) кругами:

1, 2, 3 — после заточки; 4, 5, 6 — после 5000 м пути резания.

на передней поверхности образуется заметно выраженная лунка износа (рис. 78). При этом шероховатость режущей кромки определяется не величиной ее сколов, а глубиной проточин, выходящих на лезвие и образующихся на калибрующей ленточке вследствие износа (рис. 78). Возникшие на лезвии неровности несколько меньше соответствующих этим неровностям проточин на калибрующей ленточке

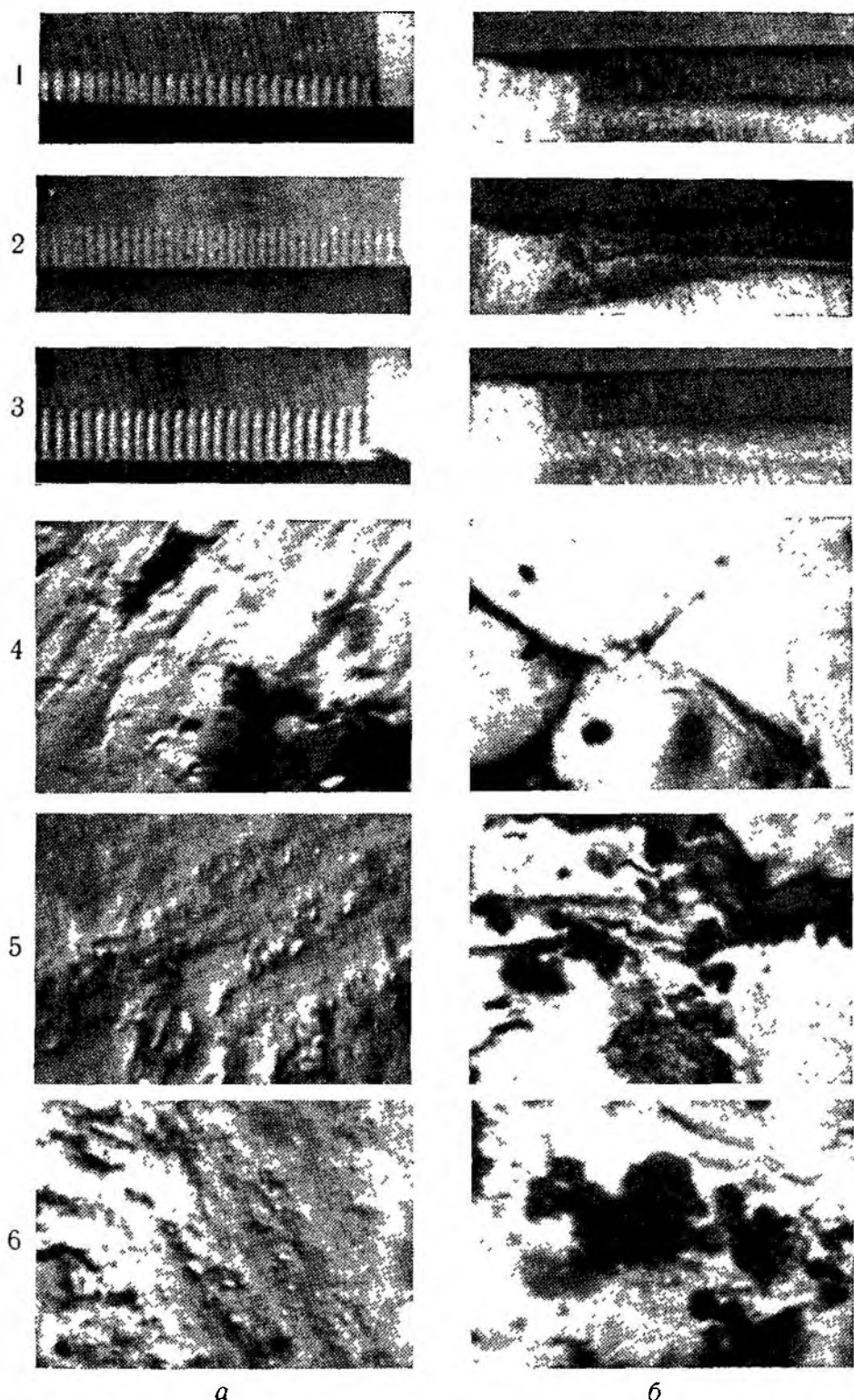


Рис. 78. Характер износа калибрующей части зуба развертки, заточенного алмазным (а) и абразивным (б) кругами после 5000 м пути резания:

1, 4 — сплав ВК2; 2, 5 — сплав ВК4; 3, 6 — сплав ВК8.

(см. рис. 77), что обусловлено их геометрической взаимосвязью (см. гл. VI).

Следует отметить, что при износе калибрующей части развертки, заточенной алмазным кругом, шероховатость и острота режущей кромки интенсивно ухудшаются только в начальный период износа, а затем процесс износа стабилизируется. Характерно, что даже у изношенной развертки в этом случае шероховатость и острота лезвия лучше, чем у развертки, заточенной абразивным кругом (см. рис. 76). Вследствие этого даже при одинаковой величине износа калибрующей ленточки работоспособность развертки, заточенной алмазным кругом, полностью сохраняется и период ее стойкости определяется только ее размерным износом.

При увеличении радиуса округления режущей кромки после абразивной заточки до $\rho = 30 \dots 40$ мкм процесс развертывания практически невозможно продолжить из-за интенсивного нагрева и деформации изделия, а также возникновения значительных вибраций, резко ухудшающих шероховатость и точность гильз.

При износе развертки, заточенной алмазным кругом, на калибрующей ленточке образуются четко выраженные проточки с шагом, равным продольной подаче (рис. 78). Такие проточки наблюдаются у всех марок твердого сплава. Глубина их у различных марок твердого сплава неодинакова и после 5000 м пути резания достигает 5—15 мкм (см. рис. 76, 77). Наиболее глубокие проточки образуются у сплава ВКЧ. У малокобальтовых хрупких сплавов глубина проточки уменьшается в результате осыпания выступов, а у высококобальтовых — вследствие их пластического выравнивания.

При износе калибрующей ленточки развертки, заточенной абразивным кругом, четко выраженные проточки отсутствуют (рис. 78). В этом случае высота микронеровностей на калибрующей ленточке даже несколько меньше, чем после алмазной заточки (см. рис. 76).

У сплава ВК2 сколы режущей кромки настолько значительны, что они охватывают часть калибрующей ленточки (рис. 78). Наряду с крупными сколами на ленточке возникает хрупкое разрушение поверхностного слоя.

Более детальное изучение изношенных участков калибрующей ленточки, обработанной алмазным и абразивным кругами, с помощью электронного микроскопа при увеличении $\times 5000$ позволяет сделать выводы о различном

механизме износа поверхностного слоя. На участках ленточки, обработанной алмазным кругом, при износе отчетливо видны следы, оставленные твердыми частицами цементита закаленного чугуна, который, подобно абразивным зернам, царапает поверхностный слой, образуя глубокие проточины (рис. 78). При износе ленточки, обработанной абразивным кругом, царапин и частиц цементита почти не выявляется, но зато хорошо видны расколовшиеся карбидные зерна и сколы отдельных участков этих зерен (рис. 78). Такой характер износа поверхности твердого сплава может быть вызван растягивающими напряжениями, возникающими после абразивной обработки, а также вследствие вибраций, вызванных недостаточной остротой лезвия и неблагоприятным соотношением толщины среза и радиуса округления режущей кромки, приводящих в итоге к ударным нагрузкам на калибрующей ленточке. Очевидно, что при таком характере нагрузок относительно непрочные вершины выступов будут скалываться в первую очередь, и вследствие этого проточины на калибрующей ленточке не смогут сохраняться, как после алмазной обработки.

Процессы такого хрупкого разрушения локализуются в основном в объеме выступающих неровностей, поэтому увеличения ширины калибрующей ленточки зуба развертки по мере износа после алмазной и абразивной обработки несущественно различаются между собой. Вместе с тем сказывается также относительно небольшое участие калибрующей ленточки в процессе резания вследствие нежесткости и значительной деформации тонких стенок гильзы. В этом случае при малых толщинах среза основная работа резания выполняется главной и вспомогательной режущими кромками, характер и интенсивность износа которых существенно зависят от условий заточки.

Для выяснения зависимости износостойкости рабочих поверхностей инструмента от условий заточки были выполнены сравнительные стойкостные испытания резцов, оснащенных сплавами Т30К4 и Т15К6, при точении стали 65 соответственно с малыми ($v = 172$ м/мин, $S = 0,11$ мм/об, $t = 0,4$ мм) и средними ($v = 132$ м/мин, $S = 0,23$ мм/об, $t = 0,75$ мм) сечениями среза (рис. 79). При точении, в отличие от развертывания, рабочие поверхности инструмента испытывают значительные нагрузки, что совместно с неблагоприятным состоянием поверхностного слоя после абразивной обработки интенсифицирует износ.

При анализе результатов стойкостных испытаний можно увидеть взаимосвязь различной величины и характера износа режущей части инструмента с напряженным состоянием этой зоны. Как было показано, глубина остаточного напряженного слоя даже после алмазного шлифования составляет 40—80 мкм. Причем после алмазной обработки вольфрамокобальтовых сплавов при широком варьировании условий заточки в поверхностном слое возникают остаточ-

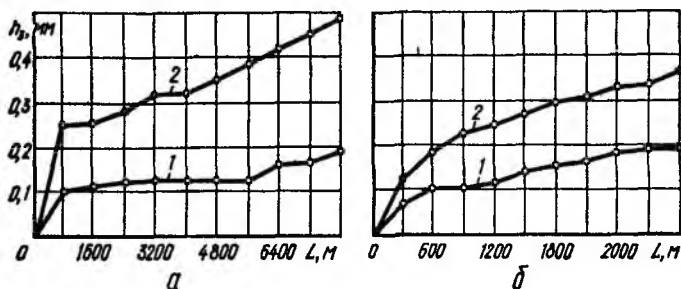


Рис. 79. Износ по задней грани h_3 твердосплавных резцов, оснащенных сплавами Т30К4 (а), Т15К6 (б) и заточенных кругами: 1 — АСО 50/40 — 100% — Б1 ($v_{кр} = 30$ м/с, $S_{пр} = 1,0$ м/мин, $S_{п} = 0,01$ мм/дв. код). 2 — КЗ — 25 — СМ1К ($v_{кр} = 10$ м/с, $S_{пр} = 4,0$ м/мин, $S_{п} = 0,03$ мм/дв. код).

ные сжимающие напряжения, а после абразивной — растягивающие. При алмазной обработке титановольфрамокобальтовых сплавов в зависимости от тепловой напряженности процесса в поверхностном слое могут возникать как сжимающие, так и растягивающие остаточные напряжения. Условия алмазной заточки инструментов, подвергающихся стойкостным испытаниям, обеспечивали формирование в поверхностном слое только сжимающих остаточных напряжений. Поэтому более высокую износостойкость инструментов, заточенных алмазными кругами, можно было бы объяснить благоприятным влиянием растягивающих напряжений. Однако такое суждение не может быть исчерпывающим и однозначным.

Так, исследования износостойкости образцов из твердого сплава ВК8 при истирании диском из стали ЭИ481 с охлаждением 0,5%-ным раствором $K_2C_2O_4$ при $v = 50...100$ м/мин и нагрузке $P = 160...500$ Н показали, что интенсивность износа твердого сплава в значительной степени зависит от знака и величины напряжения его поверхностного

слоя (рис. 80, а) [46]. Напряжения сжатия значительно ускоряют износ твердого сплава. Растягивающие напряжения в зависимости от их величины по-разному влияют на износ: напряжения до 0,5 ГПа снижают износ твердого сплава, а более высокие — резко увеличивают его. Износ твердого сплава возрастает в 1,5—2 раза в тех случаях, когда твердый сплав имеет значительные напряжения в поверхностном слое независимо от их знака.

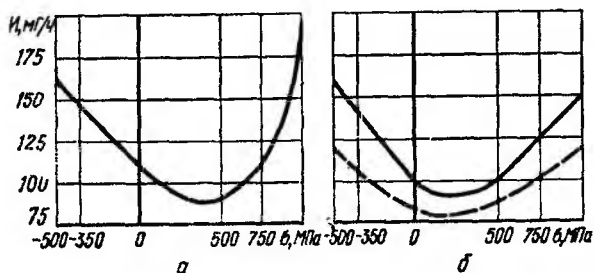


Рис. 80. Влияние остаточных напряжений σ на износостойкость твердого сплава по данным различных авторов:

а — [46]; б — [23].

Из графика изменения износостойкости твердого сплава после обработки абразивными и алмазными кругами (рис. 80, б) видно, что при алмазной обработке износостойкость твердого сплава изменяется в зависимости от величины и знака остаточных напряжений с такой же закономерностью, как и при абразивной, но с меньшей величиной износа (штриховая линия). Уменьшение величины износа объясняется более низкой шероховатостью поверхности, достигаемой при алмазной обработке [23].

Приведенные примеры иллюстрируют зависимость износостойкости твердых сплавов только от величины остаточных напряжений, возникающих в поверхностном слое при шлифовании. Однако они не позволяют сделать окончательный вывод о положительном влиянии на износостойкость инструмента растягивающих напряжений без учета знака и величины временных напряжений, возникающих на изнашиваемых участках в процессе эксплуатации инструмента под действием температур и сил резания.

Предположение, что сжимающие остаточные напряжения благоприятно влияют на свойства изделия, а растягивающие — отрицательно, не всегда подтверждается также для

деталей. Например, полагают, что присутствие остаточных напряжений любого знака благоприятно для деталей, работающих в условиях трения износа [40]. Есть предположения, что механическая обработка по-разному влияет на износостойкость в основном из-за шероховатости и наклепа поверхностного слоя, а не вследствие остаточных напряжений.

Также разноречивы мнения по вопросу влияния остаточных напряжений на статическую прочность. Считают, что остаточные напряжения не могут влиять на условия разрушения детали, так как появление при нагружении пластической деформации выравнивает неоднородность деформации по сечению и освобождает изделие от остаточных напряжений. В случае затруднения пластической деформации остаточные напряжения снижают сопротивление материала разрушению. Особенно это относится к хрупким материалам.

Следует отметить, что режущая часть инструмента в процессе стружкообразования находится в специфических условиях, существенно отличающихся от условий проведения испытаний деталей машин или образцов на износостойкость при трении, на статическую, динамическую, контактную, усталостную прочность и т. д.

В процессе резания инструмент может испытывать все эти виды нагружения в условиях нестационарного температурно-силового режима, изменяющегося как во времени, так и в пространстве, а также при сложных физико-химических явлениях в контактной зоне, обусловливаемых постоянно образующимися ювенильными контактными поверхностями и т. д. Поэтому взаимосвязь эксплуатационных свойств изделий с микрогеометрическими и физико-механическими параметрами поверхности и поверхностного слоя целесообразнее анализировать при дифференцированных испытаниях, когда можно максимально выделить и рассмотреть независимое влияние каждого отдельного фактора.

Принятые при стойкостных испытаниях разверток вид обработки и марка обрабатываемого материала (серый чугун СЧ15-32 в закаленном состоянии) исключают заметное влияние наростообразования, что позволяет рассматривать непосредственное влияние алмазной и абразивной заточки на износ режущей кромки.

Различный характер и величина износа режущей части зубьев разверток после алмазной и абразивной обработки

нельзя объяснить только неодинаковым исходным напряженным состоянием поверхностного слоя.

На различие в величине износа инструментов после алмазной и абразивной заточки влияет также микрогеометрия их режущей части и прежде всего острота режущей кромки. Лучшая исходная микрогеометрия режущей части инструмента после алмазной заточки, более острая режущая кром-

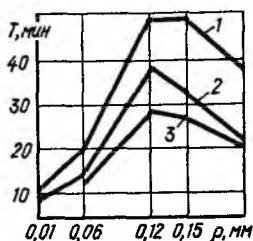


Рис. 81. Зависимость стойкости резцов T от радиуса округления режущей кромки ρ для сплавов:

1 — T15K6 при $S = 0,85$ мм/об; 2 — T5K10 при $S = 0,85$ мм/об, 3 — T5K10 при $S = 1,2$ мм/об.

ка снижают усилия резания и тепловыделение, облегчают процесс стружкообразования, что совместно с более благоприятным напряженным состоянием поверхностного слоя уменьшает интенсивность и величину износа режущей части инструмента не только на начальных, но и на более поздних стадиях износа. В этом проявляется существенное влияние остроты режущей кромки на работоспособность инструмента.

Однако более острая режущая кромка после алмазной заточки не всегда благоприятно влияет на повышение работоспособности инструмента. Определенным условиям процесса механи-

ческой обработки должна соответствовать оптимальная острота режущей кромки. Установлено, что оптимальная величина радиуса округления режущей кромки зависит от толщины среза и марки инструментального материала и может составлять 120 мкм [80]. В исследованиях [80] за критерий стойкости при обработке валов из стали 40X (HB 240—270) принимались выкрашивание резца (потеря им режущих свойств) или величина износа по задней поверхности $h_z = 1...1,2$ мм. Увеличение или уменьшение ρ от оптимального значения приводит к значительному снижению стойкости резцов. Степень влияния ρ на стойкость увеличивается при уменьшении толщины среза (рис. 81, кривые 2, 3), особенно у резцов, оснащенных сплавом T15K6, в сравнении с T5K10.

Для инструментов, работающих с тонкими сечениями среза, когда критерием стойкости является качество обработанной поверхности, значительное увеличение ρ приводит к отрицательным явлениям. Установлено, что увеличение ρ от 7 до 50 мкм ухудшает шероховатость обработанной по-

верхности в 2—4 раза [12]. Увеличение радиуса округления до 100 мкм приводит к резкому возрастанию усилий протягивания и образованию на поверхности значительной волнистости. Одновременно наблюдается увеличение глубины наклепанного слоя на 50—60%.

МЕХАНИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ

Исследованию механической прочности твердосплавных материалов посвящено значительное количество работ. В них рассматривается влияние на прочность различных технологических факторов как в процессе спекания твердых сплавов, так и при шлифовании.

Для оценки механической прочности твердых сплавов измеряется твердость, прочность на изгиб, растяжение или сжатие, ударная вязкость, усталостная прочность и термостойкость.

Анализ результатов исследований показывает, что от выбора критерия прочности существенно зависят результаты сравнительных испытаний. Так установлено, что после алмазного шлифования твердых сплавов предел прочности при изгибе повышается в 1,2—1,5 раза, ударная вязкость — в 1,15—1,3, а ударная долговечность — до 10 раз в сравнении с образцами после спекания [7, 20]. После шлифования твердых сплавов кругами из карбида кремния зеленого предел прочности снижается на 30—40% по сравнению с образцами, не подвергавшимися обработке после спекания. Снижение предела прочности твердого сплава объясняется образованием микротрещин в поверхностном слое при шлифовании кругами марки КЗ, которые обнаруживались при помощи магнитной дефектоскопии. Если удалить алмазным шлифованием дефектный слой у сплава ВК6 глубиной 0,2 мм и у сплава ВК15 0,1 мм, то можно достичь такой же прочности, как и после алмазного шлифования исходных образцов. Повышение прочности при изгибе образцов, шлифованных алмазными кругами, в сравнении с исходной прочностью обусловлено удалением поверхностного дефектного слоя, образующегося в процессе прессования и спекания твердого сплава [20]. Кроме того, наблюдается также стабилизация предела прочности при изгибе после алмазного шлифования в сравнении с прочностью исходных образцов.

Сравнительно широкий диапазон повышения предела прочности при изгибе после алмазного шлифования (20—

50%) вызван значительным разбросом исходной прочности образцов как одной, так и различных партий изготовления. Снижению прочности при изгибе у образцов, шлифованных кругами КЗ, соответствует более узкий диапазон (30—40%).

Поскольку методикой исследований [20] предусматрива-

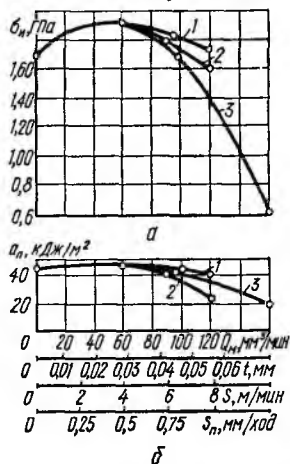


Рис. 82. Изменение предела прочности при изгибе (а) и ударной вязкости (б) образцов из твердого сплава ВК20 в зависимости от параметров режима шлифования алмазным кругом А 63/50—100% — М1:

1 — $S_{\text{п}} = \text{var}$, $S_{\text{пр}} = 4$ м/мин, $t = 0,03$ мм; 2 — $S_{\text{пр}} = \text{var}$, $t = 0,03$ мм, $S_{\text{п}} = 0,05$ мм/ход; 3 — $t = \text{var}$, $S_{\text{пр}} = 4$ м/мин, $S_{\text{п}} = 0,5$ мм/ход.

лось удаление алмазным кругом дефектного слоя, образованного при шлифовании кругом марки КЗ или в процессе прессования и спекания образцов, то на основании приведенных результатов можно предположить, что повышение прочности твердого сплава вызвано совместным влиянием двух факторов: отсутствием дефектного слоя и состоянием вновь сформированной поверхности и приповерхностного слоя при алмазном шлифовании. О степени влияния каждого из этих факторов можно судить только косвенно на основании имеющихся экспериментальных данных.

В результате исследований [7, 20] установлено, что при алмазном шлифовании изменение шероховатости обработанной поверхности в интервале $R_a = 0,63 \dots 0,16$ мкм не влияет на предел прочности при изгибе. При этом диапазон параметров режима шлифования изменялся в значительных пределах. При шлифовании алмазным кругом на связке К5 предел прочности при изгибе не снижался с увеличением глубины шлифования до 0,1 мм; для связки Б1 снижение прочности начинается при глубине шлифования 0,06 мм; для связки МС1 наблюдается уменьшение прочности при глубине 0,04 мм и достигает более пятикратного снижения при глубине 0,06 мм. Обработка сплава ВК6 алмазными кругами на связке МС1 при такой глубине резания сопровождается образованием на отдельных участках обработанной поверхности микротрещин, которые служат причиной резкого снижения прочности при изгибе.

Аналогичные закономерности были установлены в ряде других исследований [7, 52]. Из графиков (рис. 82) видно некоторое повышение прочности при изгибе образцов из сплава ВК20, шлифованных алмазным кругом на связке М1, при увеличении глубины шлифования до 0,03 мм. Увеличение глубины шлифования до 0,05 мм уменьшает предел прочности при изгибе до исходного состояния нешлифованного образца.

Дальнейший рост глубины шлифования до 0,08 мм вызывает снижение прочности при изгибе более чем в три раза. При этом на обработанной поверхности наблюдаются значительные вырывы и микротрещины. Утверждение об отсутствии трещин в поверхностном слое при алмазном шлифовании твердых сплавов справедливо только в том случае, когда режимы шлифования выбраны в соответствии с характеристикой алмазного инструмента и условиями теплоотвода [6].

Установлено, что увеличение глубины шлифования сплава ВК6 до 0,1 мм при работе кругами на связках МО4 и МО13 не снизило величины предела прочности при изгибе (рис. 83) [52]. При работе кругами на связке Б8 уже при глубине шлифования 0,06 мм наблюдается значительное снижение прочности, которое еще более понижается при увеличении глубины шлифования до 0,1 мм. Такое снижение прочности образцов объясняется появлением субмикротрещин, о чем свидетельствует уменьшение остаточных напряжений при глубине шлифования 0,1 мм в сравнении с глубиной обработки 0,06 мм.

Сопоставляя приведенные на рис. 82—84 результаты изменения прочности при изгибе образцов от условий алмазного шлифования, следует отметить одну характерную особенность. Снижение прочности при изгибе наблюдается при образовании трещин. Степень влияния трещин, по-видимому, определяется их развитостью как по глубине, так и на поверхности.

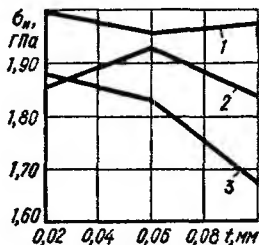


Рис. 83. Изменение предела прочности при изгибе σ_i образцов из твердого сплава ВК6 в зависимости от глубины шлифования t алмазными кругами прямого профиля ($v_{кр} = 28$ м/с, $S_{пр} = 1,0$ мм/мин и $S_{п} = 1,0$ мм/ход):
1 — АСВ 100/80 — МО4; 2 — АСВ 100/80 — МО13; 3 — АСО 100/80 — Б8.

Из графиков (рис. 82—84) следует, что снижение прочности образцов при шлифовании кругами на связках, не склонных к трещинообразованию, за отдельными исключениями, не достигает уровня прочности твердого сплава в исходном нешлифованном состоянии. Очевидно, этой величиной ограничивается предельный вклад алмазного шлифования в повышение прочности при изгибе твердого сплава.

При испытании образцов на ударную вязкость достоинства алмазной обработки твердых сплавов проявляются в меньшей мере, чем при испытании на изгиб.

Из рис. 82 видно, что исходные нешлифованные образцы показывают одинаковую ударную вязкость с образцами, имеющими максимальную прочность при изгибе после алмазного шлифования. Кривые 2 и 3 при испытании на прочность при изгибе и ударную вязкость показывают даже противоположные результаты. В то же время долговечность при ударном нагружении на порядок выше у образцов, шлифованных алмазными кругами, в сравнении с нешлифованными [20]. По-видимому, этот метод испытания наиболее соответствует механизму разрушения твердых сплавов.

На основании теории хрупкого разрушения напряжение разрушения определяется только напряжением, необходимым для распространения трещины, а не зарождения ее. Напряжение же, необходимое для распространения трещины, определяется работой, совершаемой при распространении; при этом распространение трещины по кобальту связано с работой пластической деформации. Трещина может пересекать карбидные зерна, когда это энергетически выгоднее, чем огибание. Но такое распространение трещины наблюдается только при встрече с весьма крупными карбидными зернами. В твердых сплавах до нагружения из-за пор или высоких термических микронапряжений всегда могут быть в наличии зародышевые трещины. В исходном состоянии вследствие резко различающихся коэффициентов линейного расширения фаз в поверхностном слое твердого сплава возникают значительные межфазные микронапряжения, причем в кобальте всегда растягивающие. Они могут привести к образованию зародышевой трещины до нагружения образца или в процессе его испытания. Этим можно объяснить повышение прочности при изгибе образцов, шлифованных алмазным кругом, когда удален дефектный слой. Алмазное шлифование при слабой тепловой напряженности

процесса резания формирует сжимающие микронапряжения в карбидной и кобальтовой фазах, что исключает вероятность появления зародышевых трещин. С ужесточением режима алмазного шлифования усиливается роль теплового фактора и в поверхностном слое могут возникать растягивающие остаточные макронапряжения, что облегчает появление зародышевых трещин. При образовании значительных трещин прочность образцов катастрофически падает.

Неодинаковая степень повышения прочности твердого сплава после алмазного шлифования в сравнении с нешлифованными образцами при разных методах испытания может быть обусловлена различием пластической деформации в зависимости от способа нагружения.

Известно, что при ударном нагружении лучше сопротивляется разрушению не обязательно более прочное тело (прочность которого оценивалась при статическом нагружении). Тело с малой пластичностью будет слабее сопротивляться разрушению, чем тело с меньшим пределом прочности, но подвергающееся до разрушения значительной пластической деформации [44].

После алмазного шлифования может создаваться перенапряжение вследствие исчерпания пластичности в кобальтовой фазе. В упрочненном кобальте трещина будет распространяться, как и в карбидной фазе, практически без пластической деформации. Поэтому ударная вязкость после алмазного шлифования соизмерима с исходными нешлифованными образцами, а с ужесточением режима алмазного шлифования становится даже меньше, чем у исходных образцов (рис. 82, б).

Исходя из теории хрупкого разрушения, анализ рассмотренных экспериментальных данных позволяет высказать суждение о преобладающем влиянии на механическую прочность дефектов обработанной поверхности и поверхностного слоя в виде микро- и субмикротрещин. Поэтому представляется целесообразным более подробно рассмотреть

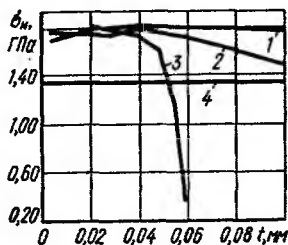


Рис. 84. Изменение предела прочности при изгибе образцов из твердого сплава ВК6 в зависимости от глубины шлифования алмазными кругами прямого профиля:

1 — АСП 125/100 — К5; 2 — АСО 125/100 — Б1; 3 — АСП 125/100 — МС1; 4 — прочность сплава в исходном (нешлифованном) состоянии.

некоторые закономерности трещинообразования при алмазном шлифовании твердых сплавов.

ТЕРМОСТОЙКОСТЬ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ

Термостойкость характеризуется способностью хрупких тел противостоять термическим ударам, сохраняя свою целостность. Причиной термического удара является мгновенное изменение температуры. Чем быстрее протекает это изменение и выше градиент температур, тем большие возникают термические напряжения вследствие неодинакового теплового расширения различных участков тела. Возникающие при этом временные напряжения могут вызвать существенное изменение исходных физико-механических свойств тела вплоть до его разрушения. Величина этих изменений в определенной мере может характеризовать термостойкость материала. Критериями количественной оценки термостойкости могут служить разность температур нагрева и охлаждения, при которой появляются трещины, или же количество циклов нагрева и охлаждения до появления трещин при заданной разности температур, а также потеря твердым телом исходных физико-механических свойств после заданного количества тепловых ударов. Для оценки термостойкости могут быть приняты также и другие критерии, характеризующие изменения эксплуатационных свойств материала. Таким образом, термостойкость в определенной мере характеризует усталостную прочность материалов циклическим термическим нагрузкам.

Известно, что при абразивном шлифовании твердых сплавов основным дефектом является образование сетки трещин на обработанной поверхности, что отрицательно сказывается на эксплуатационных свойствах инструмента. Причина появления трещин — высокая температура, возникающая в зоне шлифования. При алмазной заточке твердосплавного инструмента температура в зоне шлифования ниже, чем при абразивной, что создает благоприятные предпосылки для обеспечения качественной обработки. Однако, как показали исследования, если неправильно выбраны характеристики алмазного круга и условия шлифования, на пластинках твердого сплава могут появляться не только трещины, но и сколы. Ниже рассматриваются основные факторы и закономерности, определяющие термостойкость твердых сплавов в зависимости от условий алмазной обработки.

Процесс заточки инструментов при жесткой схеме шлифования сопровождается циклическими нагревами до значительных температур и последующим охлаждением. Каждый проход представляет собой цикл нагрева и охлаждения, в течение которого изменяется напряженное состояние в поверхностном слое обрабатываемого материала.

В процессе шлифования тонкие поверхностные слои мгновенно нагреваются и расширяются. Вследствие плохой теплопроводности твердого сплава нижележащие менее нагретые слои препятствуют деформации поверхностных слоев, и в последних возникают сжимающие напряжения. Так как твердый сплав обладает высоким пределом прочности на сжатие, то этот вид напряжений наименее опасен для образования трещин. После выхода круга из контакта с обработанной поверхностью она интенсивно охлаждается за счет теплоотвода в твердосплавную пластинку и окружающую среду. При этом по сечению образца температура распределяется неравномерно, а так как внутренние слои остывают медленнее верхних, то в поверхностных слоях возникают временные растягивающие напряжения, которые могут превысить предел прочности твердого сплава и вызвать появление трещины на поверхности пластинки. Следовательно, термостойкость твердого сплава в значительной мере должна определяться физико-механическими свойствами и в первую очередь теплопроводностью, коэффициентом линейного расширения и прочностью на растяжение, а также абсолютными значениями и характером распределения температур по сечению образца. К возникновению напряжений и образованию трещин могут также привести структурные превращения в поверхностном слое, происходящие вследствие воздействия высоких температур. Однако этот источник внутренних напряжений более характерен для инструментальных сталей, так как в твердых сплавах при алмазном шлифовании температура в зоне резания ниже той температуры, при которой происходят структурные превращения в карбиде вольфрама или карбиде титана [77].

Неравномерность изменения объемов отдельных участков образца определяется температурой нагрева и коэффициентом теплового расширения материала. Температура во многом зависит от условий шлифования и свойств обрабатываемого материала, а коэффициент теплового расширения является его теплофизической константой. Очевидно

что при больших значениях коэффициента теплового расширения в нагретых слоях образца будут происходить значительные объемные изменения, приводящие к возникновению напряжений сжатия или растяжения. Следовательно, инструментальные материалы, имеющие низкие коэффициенты теплового расширения, должны проявлять меньшую склонность к образованию трещин при шлифовании.

Таблица 25

Влияние состава твердого сплава на коэффициент теплового расширения

Состав, % по массе			Коэффициент теплового расширения $\alpha \times 10^{-6} \cdot 1/^{\circ}\text{C}$
WC	TiC	Co	
95,5	—	4,5	3,4
80	—	20	4,7
			6,2
86	5	9	5,5
69	25	6	7,0

В табл. 25 приведены значения коэффициентов теплового расширения некоторых марок твердых сплавов [22, 76]. Из данных таблицы видно, что сплавы группы ВК должны быть более термостойкими, чем сплавы группы ТК. Существенное влияние на термостойкость оказывает также соотношение коэффициентов теплового расширения составляющих компонентов твердых сплавов. Так, например, при $T = 20 \dots 100^{\circ}\text{C}$ коэффициент теплового расширения карбида вольфрама $\alpha_{\text{WC}} = 41 \cdot 10^{-7}$, а кобальта $\alpha_{\text{Co}} = 135 \cdot 10^{-7}$, т. е. их отношение составляет 1 : 3. Вследствие этого при нагреве или охлаждении даже в тончайших слоях твердого сплава с практически одинаковой температурой, карбиды и кобальт получают различные объемные изменения, что вызывает появление напряжений. Последнее в значительной степени влияет на термостойкость сплавов группы ТК, имеющих монокристаллический карбидный каркас, промежутки которого заполнены кобальтом. При такой структуре сплава в результате нагрева кобальт будет как бы разрывать карбидный каркас и способствовать образованию зародышевых трещин. Для сплавов группы ВК, не имеющих сплошного карбидного каркаса, более вероятным является образование трещин при охлаждении.

Термостойкость материалов существенно зависит от коэффициента теплопроводности λ , и коэффициент температуропроводности определяет способность материала проводить тепло и численно равен количеству тепла, протекающему при установившемся состоянии через единицу поверх-

ности определенной длины в единицу времени при разности температур в один градус. Коэффициент температуропроводности характеризует способность материала повышать свою температуру с большей или меньшей скоростью под действием притекающего тепла.

Физически коэффициент температуропроводности характеризует способность материала выравнивать температуру: чем больше k , тем больше скорость передачи тепла от од-

Таблица 26

Теплофизические константы твердых сплавов

Состав, % по массе			Плотность, Мг/м ³	Теплопроводность, $4,187 \times 10^3 \text{ Вт/М} \cdot \text{К}$	Удельная теплоемкость, $4,187 \times 10^3 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$	Температуропроводность, $10^{-4} \cdot \text{м}^2/\text{с}$
WC	TiC	Co				
97	—	3	15,1—15,2	0,169	0,044	0,253
92	—	8	14,4—14,8	0,141	0,04	0,242
79	15	6	11,0—11,7	0,065	0,059	0,097
69	25	6	10,0—10,4	0,05	0,08	0,061

ного участка к другому, тем интенсивнее рассеивается тепло. Таким образом, рассмотренные константы в определенной степени характеризуют температурный градиент, а значит, и термические напряжения в поверхностном слое твердого тела.

В табл. 26 приводятся значения основных теплофизических констант для некоторых твердых сплавов [22, 76].

Анализируя данные этой таблицы, можно сделать следующие выводы: теплопроводность и температуропроводность твердых сплавов группы ТК и ВК снижаются с увеличением содержания в них кобальта. Сплавы группы ТК имеют более низкие значения коэффициентов λ и k , чем сплавы группы ВК, причем увеличение содержания в сплаве карбида титана снижает эти коэффициенты. Можно полагать, что аналогичным образом должна изменяться и термостойкость твердых сплавов.

На основании анализа факторов, определяющих термостойкость твердых сплавов, можно считать, что повышение стойкости способствует: снижение температуры в зоне резания, увеличение прочности и теплопроводности, а также

уменьшение коэффициента теплового расширения. Исходя из этого, следует, что сплавы группы ВК, обладающие по сравнению со сплавами группы ТК более высокой прочностью и теплопроводностью и меньшим коэффициентом теплового расширения, должны быть более термостойкими. Для сплавов группы ТК с увеличением содержания в сплаве карбида титана снижается прочность и теплопроводность, растет коэффициент теплового расширения, увеличиваются силы резания и теплообразование, в результате

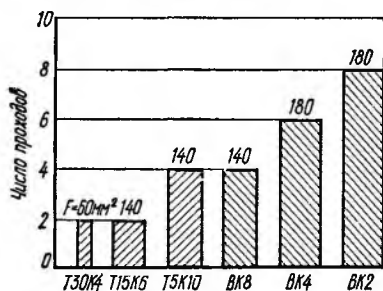


Рис. 85. Термостойкость различных марок твердого сплава при алмазном шлифовании кругом АСО 160/125 — 25% — В1.

чего термостойкость сплава будет уменьшаться. Сложнее установить склонность к трещинообразованию различных марок твердого сплава группы ВК. Так, например, наряду с увеличением прочности сплава при повышении содержания кобальта снижается теплопроводность этого сплава, увеличивается коэффициент линейного расширения, повышаются силы резания и теплообразование. В этом

случае термостойкость сплава будет определяться суммарным взаимодействием указанных факторов.

Склонность различных марок твердых сплавов к трещинообразованию исследовалась при различных условиях алмазной обработки. Методика предусматривала постепенное ужесточение условий шлифования за счет увеличения числа проходов, поперечной подачи, площади контакта пластинки с кругом F . Шлифование производилось до момента появления трещин на обрабатываемой поверхности.

Присутствие трещин контролировалось методом цветной дефектоскопии, а также с помощью оптического и электронного микроскопов.

Склонность твердого сплава к трещинообразованию оценивалась относительно. Если трещины возникали при более жестких условиях шлифования твердого сплава, то эта марка сплава считалась менее склонной к трещинообразованию, и наоборот.

Выполненные исследования позволили расположить различные марки твердых сплавов по их склонности к трещино-

образованию в следующем убывающем порядке: Т30К4, Т15К6, ВК8, ВК4, ВК2.

На рис. 85 представлены диаграммы, показывающие условия возникновения трещин при алмазном шлифовании различных марок твердых сплавов. Условия обработки следующие: для сплавов Т30К4, Т15К6, Т5К10 $v_{кр} = 27$ м/с, $S_{пр} = 1,0$ м/мин, $S_n = 0,01$ мм/ход, без охлаждения; для

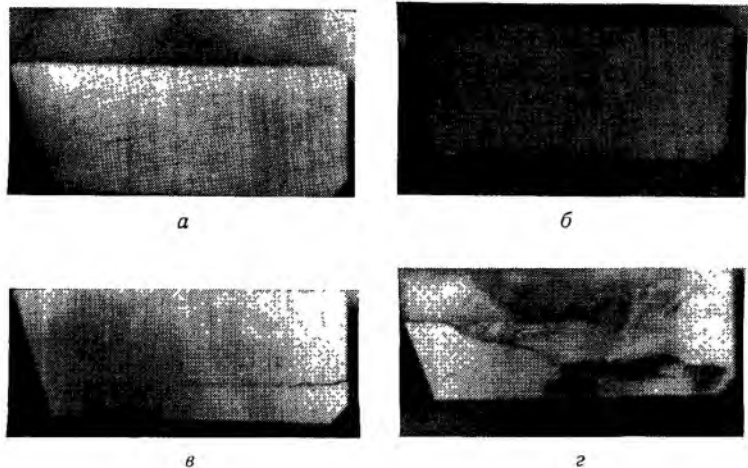


Рис. 86. Образование трещин при многопроходном шлифовании сплава Т30К4 кругом АСО 100/80 — 100% — Б1 ($v_{кр} = 30$ м/с, $S_{пр} = 1,0$ м/мин, $S_n = 0,01$ мм/ход, без охлаждения).

сплавов ВК8, ВК4, ВК2 $v_{кр} = 27$ м/с, $S_{пр} = 1,0$ м/мин, $S_n = 0,03$ мм/ход, без охлаждения.

Сплавы группы ВК с низким содержанием кобальта оказались наиболее термостойкими, несмотря на более низкую их прочность.

В данном случае уменьшение сил резания и теплообразования, а также более высокая теплопроводность малокобальтовых сплавов группы ВК оказывают решающее влияние на повышение термостойкости.

Влияние условий шлифования на трещинообразование исследовалось при обработке наименее термостойкой марки твердого сплава — Т30К4. Площадь контакта пластинки с кругом составляла 60 мм². Шлифование производилось кругами АЧК 125 × 10 на связках Б1, К1, М1. Зернистость круга изменялась от АСО 40/28 до АСО 160/125; concentra-

ция от 25 до 200%. Параметры режима шлифования изменялись в диапазоне: v — от 10 до 40 м/с; $S_{\text{п}}$ — от 0,005 до 0,04 мм/ход, $S_{\text{пр}}$ — от 0,5 до 4,0 м/мин.

Исследования трещинообразования при многопроходном шлифовании сплава Т30К4 кругом АСО 100/80 — 100% — Б1 без охлаждения при $v_{\text{кр}} = 30$ м/с, $S_{\text{пр}} = 1,0$ м/мин, $S_{\text{п}} = 0,01$ мм/ход показали, что с ростом числа проходов увеличивается количество трещин и их глубина и даже образуются сколы.

Динамика возникновения и развития трещин и сколов на поверхности твердых сплавов представлена на рис. 86. После первых двух проходов на поверхности образца образуются едва заметные трещины (рис. 86, а). Последующие два прохода приводят к образованию двух видимых трещин: одна из них проходит вдоль всего образца, а другая — только до середины (рис. 86, б). После шести проходов эти трещины стали более глубокими (рис. 86, в), что также подтверждается поперечными шлифами. После восьми проходов развитие трещин приводит к образованию скола (рис. 86, г).

Таким образом, увеличение количества проходов (увеличение количества тепловых ударов) приводит к качественному и количественному изменению трещин. Поэтому в последующих опытах обработка образцов производилась при фиксированном числе проходов, равном десяти. Примерно за такое же число проходов в реальных условиях снимается припуск при обработке режущей части инструмента.

Приведенные исследования позволили установить влияние различных технологических факторов на трещинообразование твердых сплавов. Результаты опытов представлены на рис. 87—91.

На рис. 87 изображены зоны трещинообразования при обработке сплава Т30К4. Заштрихованная зона между линиями 1—1 и 2—2 характеризует появление трещин только на отдельных обрабатываемых образцах. Выше линии 2—2 на всех обрабатываемых образцах образуются трещины или сколы. Появление на графике переходной заштрихованной зоны вызвано, по-видимому, неоднородностью физико-механических свойств образцов твердого сплава даже одной партии изготовления, а также возможностью некоторой нестабильности процесса шлифования, которая определяется изменением состояния рабочей поверхности круга. Рекомендуемой для работы может быть только зона

ниже линии 1—1, полностью исключая образование трещин. При работе в заштрихованной зоне возможно образование трещин на отдельных изделиях.

Из графиков видно, что зона, в которой допускается обработка твердого сплава без опасности образования трещин, уменьшается с увеличением зернистости алмазного круга. Это явление можно объяснить следующим образом. С уве-

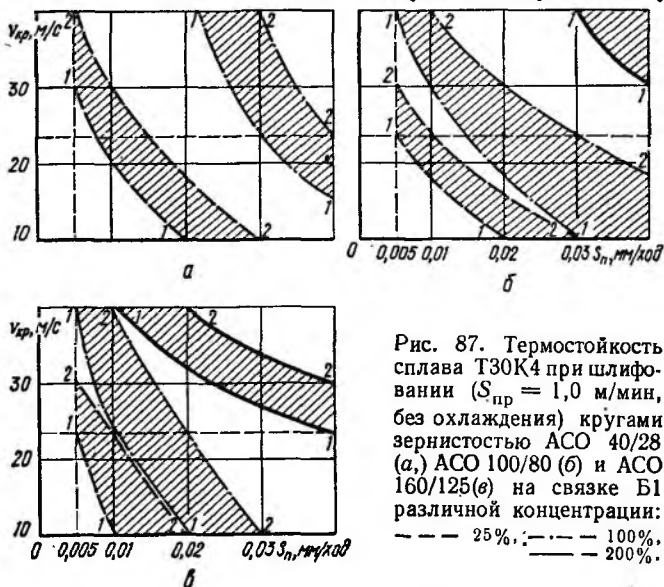


Рис. 87. Термостойкость сплава ТЗ0К4 при шлифовании ($S_{пр} = 1,0 \text{ м/мин}$, без охлаждения) кругами зернистостью АСО 40/28 (а), АСО 100/80 (б) и АСО 160/125 (в) на связке Б1 различной концентрации:
 --- 25%, ·-·- 100%,
 — 200%.

личением зернистости круга растет радиус округления вершин алмазных зерен и ухудшается процесс резания. Резание осуществляется как бы тупыми зернами, что приводит к росту сил резания и теплообразования. Наряду с этим ухудшается теплоотвод из зоны шлифования, так как уменьшается общая контактная поверхность у более крупных алмазных зерен. Поэтому при работе крупнозернистыми кругами трещины возникают при меньших значениях параметров режима резания, чем при шлифовании мелкозернистыми кругами.

С увеличением концентрации алмазов в круге растет допустимая зона обработки твердого сплава, исключая возможность образования трещин. Если для круга зернистостью АСО 160/125 25 %-ной концентрации зона отсутствия трещинообразования ограничивается $v = 20 \text{ м/с}$ и

$S_n = 0,01$ мм/ход при $S_{пр} = 1,0$ м/мин, то для круга такой же зернистости, но 200 %-ной концентрации допустимая зона шлифования значительно расширяется. При шлифовании кругом АСО 40/28 200 %-ной концентрации в исследуемом диапазоне параметров режима резания трещины вообще не возникают. Такой характер влияния концентрации алмазов в круге на трещинообразование объясняется уменьшением сил резания и теплообразования в зоне резания с ростом концентрации алмазного круга.

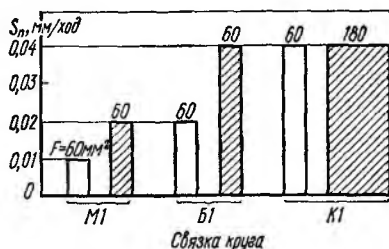


Рис. 88. Влияние связки алмазного круга на термостойкость сплава Т30К4 при шлифовании кругом АСО 100/80 — 100% ($v_{кр} = 27$ м/с, $S_{пр} = 1,0$ м/мин, без охлаждения — не заштриховано, с охлаждением — заштриховано).

и значительно расширяет зону допустимых параметров режима резания.

Существенное влияние на трещинообразование оказывает также вид связки алмазного круга. Из рис. 88 видно, что при шлифовании сплава Т30К4 без охлаждения кругами на металлической связке М1 при прочих равных условиях трещины образуются уже при $S_n = 0,01$ мм/ход, для круга на связке Б1 — при $S_n = 0,02$ мм/ход, а для круга на керамической связке К1 при $S_n = 0,04$ мм/ход.

Благоприятное влияние на снижение трещинообразования оказывает применение охлаждения. В кругах на связках М1 и Б1 в случае применения СОЖ трещины появляются только при поперечной подаче в два раза большей, чем при шлифовании без охлаждения. Для связки К1 трещины появились только после увеличения поперечной подачи в два раза и площади контакта пластинки с кругом в три раза.

Таким образом, результаты экспериментов показывают, что снижение теплообразования в зоне шлифования умень-

шает сил резания и теплообразования в зоне резания с ростом концентрации алмазного круга.

Кроме того, с ростом концентрации алмазов в круге увеличивается суммарная поверхность контакта алмазных зерен с обрабатываемой поверхностью, что улучшает теплопроводность и снижает температуру в зоне шлифования. Действие указанных факторов благоприятно сказывается на снижении интенсивности трещинообразования

шает возможность появления трещин при алмазной обработке твердых сплавов. Количество тепла, выделяемого в процессе шлифования, эквивалентно механической работе и

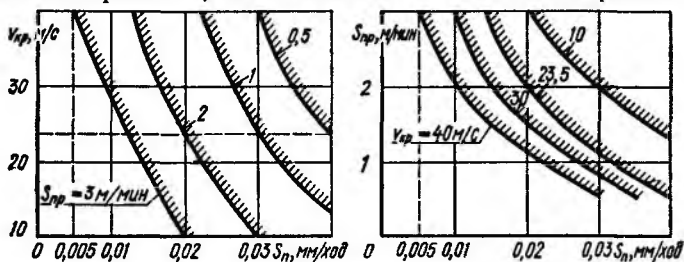


Рис. 89. Влияние параметров режима шлифования на термостойкость сплава Т30К4 при шлифовании кругом АСО 40/28 — 100% — Б1, без охлаждения (зоны образования трещин заштрихованы).

растет с увеличением скорости резания. Поэтому с увеличением скорости резания соответственно должна быть уменьшена продольная или поперечная подачи (рис. 89).

Из графиков (рис. 89, 90) видно, что с увеличением поперечной или продольной подач уменьшается допустимая зона обработки твердого сплава, исключающая возможность образования трещин. Особый интерес представляет вопрос о степени влияния продольной и поперечной подач на трещинообразование, так как именно эти два параметра режима резания определяют производительность шлифования. При выполнении данной серии опытов продольная и поперечная подачи изменялись таким образом, чтобы сохранить постоянным их произведение, характеризующее минутный съем твердого сплава.

Из графика (рис. 90) видно, что при одном и том же минутном съеме поперечная подача влияет на трещинообразование в большей степени, чем продольная.

Различное влияние продольной и поперечной подач на трещинообразование можно объяснить более интенсивным увеличением контакта связки и наполнителя с ростом

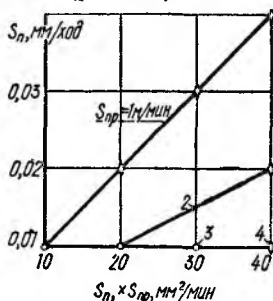


Рис. 90. Влияние продольной и поперечной подач на термостойкость сплава Т30К4 при шлифовании кругом АСО 100/80 — 100% — Б1 ($v = 27$ м/с, без охлаждения):

○ — трещин нет, ◇ — трещины есть.

поперечной подачи, что приводит к более интенсивному росту сил резания и теплообразования.

Существенное влияние на трещинообразование оказывают площадь контакта пластинки с кругом, с увеличением которой трещины появляются при более низких скоростях резания (рис. 91). При этом растет число алмазных зерен, одновременно участвующих в процессе резания. Следовательно, возрастает количество тепловых импульсов, наряду с этим увеличивается также суммарная площадь контакта связки и наполнителя с обрабатываемой поверхностью, что приводит в итоге к росту температуры в зоне шлифования и интенсифицирует трещинообразование.

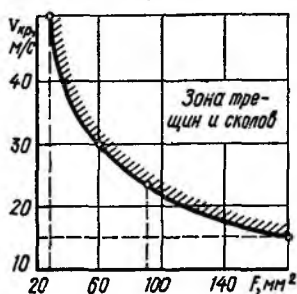


Рис. 91. Влияние площади контакта на термостойкость сплава ТЗ0К4 при шлифовании кругом АСО 100/80 — 100% — Б1 ($S_{пр} = 1,0$ м/мин, $S_{пр} = 0,02$ мм/ход, без охлаждения).

Глубина трещин составляет от 0,01 до нескольких десятых миллиметров. На отдельных пластинках образуются сколы.

Исследования авторов показали, что характерной особенностью трещинообразования при алмазном шлифовании твердых сплавов является образование

трещин глубиной в несколько миллиметров.

Образованию глубоких трещин при алмазном шлифовании твердых сплавов могут способствовать теплофизические свойства кругов, увеличивающие температурный градиент. Более высокая в сравнении с абразивными теплопроводность алмазных кругов, особенно на металлической связке, приводит к тому, что участки круга, остывшие в течение холостого хода, входят в контакт с сильно нагретым обработанным поверхностным слоем сплава и интенсивно отводят от него тепло. Это, естественно, приводит к резкому охлаждению поверхностного слоя и возникновению в нем значительных временных термических растягивающих напряжений. При определенных условиях эти напряжения могут превысить предел прочности твердого сплава и тогда на обработанной поверхности могут образоваться трещины. При абразивном шлифовании снижению глубины трещин могут способствовать более высокие температуры. При высоких температурах абразивного шлифования твердый сплав

приобретает пластические свойства, в результате чего становится возможным перераспределение термических напряжений.

Результаты экспериментов позволяют выявить общую закономерность изменения глубины трещин от условий шлифования. Все кривые имеют экстремальный характер. С ужесточением режима шлифования глубина трещин увеличивается до 3—4 мм, а затем уменьшается. Это можно объяснить тем, что при мягких режимах шлифования трещина появляется на одном из последних проходов и не успевает развиться до максимального значения к десятому проходу. С ужесточением режимов шлифования трещины образуются уже при первых проходах, а к десятому — достигают максимальной глубины.

При очень жестких режимах шлифования образование сколов наблюдается при первых проходах, и трещина не получает полного развития, что снижает ее глубину.

С уменьшением концентрации алмазного круга максимальная глубина трещин образуется при более мягких режимах резания, а у кругов высокой концентрации максимум, по-видимому, находится за пределами исследованных диапазонов режима резания. В меньшей степени на глубину трещин влияет зернистость круга. Однако установить какую-либо определенную зависимость глубины трещин от зернистости алмазного круга не представляется возможным.

1. Байор Б. Н. Анализ влияния затупления и износа круга на изменение съема металла во времени при внутреннем шлифовании.— «Семинар по точности в машиностроении и приборостроении», 1964, вып. 18, с. 27—35.
2. Богомолов Н. И. О работе трения в абразивных процессах.— «Труды ВНИИмаш», 1965, вып. 1, с. 72—79.
3. Боуден Ф. П., Тейбор Л. Трение и смазка твердых тел. М., «Машиностроение», 1968. 543 с. с ил.
4. Боуден Ф. П., Фрейтаг Е. Г. Трение твердого тела при высоких скоростях.— «Машиностроение за рубежом», 1965, № 5, с. 137—142.
5. Васильев А. М., Дилингенский М. В., Подзей В. А. Температура в зоне резания при алмазном шлифовании.— «Вестник машиностроения», 1969, № 7, с. 54—56.
6. Верецагин Л. Ф., Архипов Р. Г. Успехи и перспективы физики высоких давлений.— Вестник АН СССР, 1974, № 5, с. 40—47.
7. Влияние режимов алмазного шлифования на напряженное состояние и прочность твердого сплава ВК6.— «Синтетические алмазы», 1973, вып. I, с. 23—27. Авт.: М. Г. Лошак, В. М. Фридман, Ф. П. Смагленко, Л. Н. Кабановский.
8. Гладких Л. И., Свердлова Б. М., Фукс М. Я. Остаточные напряжения в поверхностном слое стали Р18 после шлифования ее алмазными кругами.— «Станки и режущие инструменты», 1969, вып. 10, с. 43—46.
9. Грабченко А. И. Влияние температуры резания на взаимодействие алмазного круга со сталью.— «Алмазы», 1968, вып. 4, с. 9—15.
10. Грабченко А. И., Ходоровский М. Г., Красильников Е. В. Исследование поверхности синтетических поликристаллических алмазов после шлифования.— «Синтетические алмазы», 1975, вып. I, с. 14—16.
11. Грабченко А. И., Ходоровский М. Г., Синельников А. Н. Исследование состояния поверхности алмазов АСБ, АСПК методом оптической микроскопии с применением органических реплик.— «Резание и инструмент», 1974, вып. II, с. 141—144.
12. Гречухин А. И. Влияние остроты режущей кромки на качество поверхности при обработке стали.— «Станки и инструмент», 1953, № 5, с. 23—25.
13. Дегтяренко И. С., Каменкович А. С. Выбор условий алмазной заточки по температурному критерию.— «Станки и инструмент», 1966, № 3, с. 25—28.
14. Дьяченко П. Е. Острота лезвия инструмента и качество поверхности.— «Станки и инструмент», 1950, № 2, с. 19—20.
15. Ейсс М. Л. Расщепление абразивных зерен при шлифовании.— «Конструирование и технология машиностроения. Труды американского общества инженеров-механиков», 1967, № 3, с. 98—108.
16. Епифанов В. И., Песина А. Я., Зыков Л. В. Технология обработки алмазов в бриллианты. М., «Высшая школа», 1971. 164 с. с ил.

17. *Захаренко И. П., Рыбицкий В. А.* Исследование сил резания и температуры при заточке и доводке твердосплавного инструмента кругами из синтетических алмазов. Киев, изд. ИНТИ, 1966. 16 с. с ил.

18. *Зубарь В. П., Крюков В. К., Алмасов В. В.* Исследование особенностей трения синтетических поликристаллических алмазов с конструкционными материалами.— «Резание и инструмент», 1975, вып. 13, с. 54—58.

19. *Кацура А. А., Семенов А. П.* Высокотемпературное трение окисных керамик на основе корунда. М., «Наука», 1974. 120 с. с ил.

20. *Качество поверхности, обработанной алмазами.* Киев, «Техніка», 1972. 118 с. с ил. Авт.: А. П. Шульман, Ю. И. Созин, Н. Ф. Колесниченко, А. С. Вишневский.

21. *Кашцев В. Н.* Абразивное действие электрокорундовых и карборундовых зерен при различной степени их закреплённости.— «Подшипник», 1957, № 7, с. 17—21.

22. *Киффер Р., Шварцкоп Ф. П.* Твердые сплавы. М., Металлургиздат, 1957. 664 с. с ил.

23. *Коршунов Б. С.* Алмазное шлифование. Л., «Машиностроение», 1967. 107 с. с ил.

24. *Костецкий Б. И., Протопопов Б. В.* Силы трения при резании металлов алмазными инструментами.— «Синтетические алмазы», 1969, вып. 3, с. 4—7.

25. *Крагельский И. В.* Трение и износ. М., Машиностроение, 1968. 480 с. с ил.

26. *Креймер Г. С., Алексеева Н. А., Веховская М. Р.* О механизме разрушения металлокерамических твердых сплавов.— «Труды ВНИИТС. Твердые сплавы», 1964, № 5, с. 29—35.

27. *Креймер Г. С., Баранов А. И., Алексеева Н. А.* Прочность, твердость и вязкость металлокерамических твердых сплавов в зависимости от их состава, структуры и температуры испытания.— «Труды ВНИИТС. Твердые сплавы», 1960, № 2, с. 67—76.

28. *Кузнецов В. Д.* Наросты при резании и трении. М., Изд-во технической литературы, 1956. 280 с. с ил.

29. *Кузнецов В. Д., Полосаткин Г. Д., Калашников М. Н.* Изучение процесса резания при сверхвысоких скоростях.— «Физика металлов и металловедения», 1960, вып. 3, т. 10, с. 43—52.

30. *Лейпунский О. И.* Об искусственных алмазах — «Успехи химии», 1939, № 8, 10, с. 1519—1535.

31. *Литвин Ю. А., Бутузов В. П.* О росте кристаллов искусственного алмаза.— «ДАН СССР», 1968, т. 181, № 5, с. 1123—1131.

32. *Лозинский М. Г.* Высокотемпературная металлография. М., Машгиз, 1956. 430 с. с ил.

33. *Лоладзе Т. Н., Бокучава Г. В.* Исследование износа алмазного абразивного инструмента.— «Труды ТПИ», 1965, № 3, с. 87—92.

34. *Лоладзе Т. Н., Бокучава Г. В.* К теории диффузионного износа алмазного абразивного инструмента.— «Труды ВНИИАШ», 1965, № 5, с. 103—112.

35. *Лурье Г. Б.* Критерии оценки работоспособности шлифовальных кругов.— «Абразивы и алмазы», 1965, вып. 4, с. 1—7.

36. *Мокиевский В. А., Титова В. М., Бартошинский Э. В.* Проявление пластической деформации в алмазе и некоторые вопросы, связанные с пластичностью кристаллов.— «Записки всесоюзного минералогического общества. Вторая серия», 1962, ч. 91, вып. 4, с. 76—84.

37. *Малоголовец В. Г., Гатилова Е. Г.* Исследование графитизации микропорошков синтетических алмазов по ИК-спектрам поглощения.— «Синтетические алмазы», 1970, вып. 4, с. 29—32.

✓ 38. *Маслов Е. Н.* Основные закономерности высокопроизводительного шлифования.— В кн.: Высокопроизводительное шлифование. М., Изд-во АН СССР, 1962, с. 3—17.

39. *Маслов Е. Н.* Теория шлифования материалов. М., «Машиностроение», 1974. 320 с. с ил.

40. *Маталин А. А.* Качество поверхности и эксплуатационные свойства деталей машин. М., «Машгиз», 1956. 252 с. с ил.

41. *Найдич Ю. В.* Контактные явления в металлических расплавах. Киев, «Наукова думка», 1972. 137 с. с ил.

42. *Обработка* машиностроительных материалов алмазным инструментом. М., «Наука», 1966. 251 с. с ил.

43. *Одинг И. А.* Термическая диффузия в металлах.— «ДАН СССР», 1952, т. XXXVI, № 1, с. 156—159.

44. *О сопротивлении* твердых сплавов разрушению при ударе.— «Труды ВНИИТС. Твердые сплавы», 1965, № 6, с. 83—87. Авт.: В. А. Ивенсен, З. А. Гольдберг, О. Н. Эйдук, В. А. Фальковский.

45. *Остаточные* напряжения в шлифованных изделиях из многофазных материалов.— «Физико-химическая механика материалов» 1972, № 4, с. 24—28. Авт.: Б. М. Свердлова, Л. И. Гладких, М. Я. Фукс, А. Ф. Раб.

46. *Повышение* прочности и износостойкости твердосплавного инструмента. М., «Машиностроение», 1960. 140 с. с ил. Авт.: Л. К. Куклин, В. И. Сагалов, В. Б. Серебровский, С. П. Шабашов.

47. *Подзей В. А.* К вопросу о балансе при алмазном шлифовании закаленных сталей.— «Известия вузов», 1969, № 6, с. 167—171.

48. *Примак Л. П., Скрипко Г. Ф.* Контактная температура при плоском шлифовании высокоглиноземистой керамики.— «Синтетические алмазы», 1969, вып. 4, с. 21—25.

49. *Промежуточные* преобразования структуры углерода при термической обработке синтетического алмаза.— «Синтетические алмазы», 1974, вып. 1, с. 9—14. Авт.: А. А. Хоменко, Л. Т. Ганкевич, Б. Г. Остронов, А. С. Котосонов, Н. Н. Шипков.

50. *Равинский Б. М.* Вопросы машиностроения. М., Изд-во АН СССР, 1950. 606 с. с ил.

51. *Разрушение* Т. I. М., «Мир», 1973. 616 с. с ил.

52. *Рациональная эксплуатация* алмазного инструмента. М., «Машиностроение», 1965. 240 с. с ил. Авт.: М. Е. Каминский, М. С. Наерман, Л. К. Петросян, С. А. Попов.

53. *Резников А. М.* Теплофизика алмазного шлифования.— «Синтетические алмазы», 1971, вып. 6, с. 36—38.

54. *Рентгенографическое исследование* эпюры остаточных напряжений в твердосплавных пластинках после шлифования алмазными кругами.— «Станки и режущие инструменты», 1968, вып. 7, с. 40—46. Авт.: М. Ф. Семко, Б. М. Свердлова, Л. И. Гладких, М. Я. Фукс, А. Ф. Раб..

55. *Савченко П. С., Куцовская А. М.* Термостойкость алмазов.— «Синтетические алмазы», 1969, вып. 2, с. 19—22.

56. *Сагарда А. А., Химач О. В.* Анализ работы алмазного зерна при круглом шлифовании.— «Алмазы», 1968, вып. 4, с. 20—24.

57. *Сагарда А. А., Химач О. В.* Контактная температура и силовые зависимости при резании алмазным зерном.— «Синтетические алмазы», 1972, вып. 2, с. 5—9.

58. Сагарда А. А., Мишинаевский Л. А., Бабенко О. А. Шлифованные быстрорежущих, сталей кругами из синтетических алмазов и кубонита.— «Синтетические алмазы», 1973, вып. 4, с. 39—43.

59. Семенов А. П. Исследование схватывания металлов при совместном пластическом деформировании. М., Изд-во АН СССР, 1953. 212 с. с ил.

60. Семенов А. П., Поздняков В. В., Крапошина Л. В. Трение и контактное взаимодействие графита и алмаза с металлами и сплавами. М., «Наука», 1974. 108 с. с ил.

61. Семенова-Тян-Шанская А. С. Исследование микротвердости природных и синтетических алмазов.— В кн.: Современные достижения в области технологии алмазно-абразивной обработки. Л., изд. СЗПИ 1971. с. 81—82.

62. Семко М. Ф. О некоторых физических особенностях процесса резания алмазным инструментом.— «Станки и режущий инструмент», 1966, вып. 1, с. 3—12.

63. Семко М. Ф., Грабченко А. И. О физико-механическом взаимодействии алмаза с обрабатываемыми материалами.— «Станки и режущий инструмент», 1969, вып. 10, с. 14—18.

✓ 64. Семко М. Ф., Грабченко А. И., Ходоревский М. Г. Алмазное шлифование синтетических сверхтвердых поликристаллов.— «Резание и инструмент», 1976, вып. 16, с. 18—24.

65. Семко М. Ф., Узунян М. Д. Работоспособность кругов на органической связке.— «Станки и инструмент», 1966, № 4, с. 18—23.

66. Семко М. Ф., Узунян М. Д., Юфа Э. П. Экономическое обоснование выбора алмазного круга. Харьков, «Прапор», 1971. 110 с. с ил.

67. Сердюк В. М. Оптимальные марки металлизированных алмазов для кругов на органической связке.— «Синтетические алмазы», 1970, вып. 5, с. 23—25.

68. Синопальников В. А., Эйхманс Э. Ф. Радиус округления режущих кромок твердосплавного инструмента.— «Станки и инструмент», 1965, 6, с. 35—37.

69. Синтетические алмазы в промышленности. Киев, «Наукова думка». 1974. 327 с. с ил.

70. Склерометрия. М., «Наука», 1968. 219 с. с ил.

71. Справочник по алмазной обработке металлорежущего инструмента. Киев, «Техніка», 1971. 208 с. с ил. Авт.: В. Н. Бакуль, И. П. Захаренко, Я. А. Кункин, М. З. Мильштейн.

✓ 72. Сравнительная оценка фрикционных свойств металлических связок алмазных шлифовальных кругов.— «Резание и инструмент», 1970, вып. 1, с. 12—17. Авт.: А. И. Исаев, Л. Х. Чахмачев, И. В. Есаулов, В. В. Ленский, В. А. Гладков.

73. Структурные изменения в поверхностном слое быстрорежущей стали Р18 при шлифовании алмазными кругами.— «Станки и режущий инструмент», 1967, вып. 4, с. 11—18. Авт.: М. Я. Фукс, А. И. Грабченко, Б. М. Свердлова, Л. И. Гладких, М. Д. Узунян, А. Ф. Раб.

74. Теория и практика алмазной обработки. М., изд. НИИмаш, 1969. 228 с. с ил.

75. Тепловые явления в процессах резания. Материалы семинара. М., 1970. 39 с. с ил.

76. Третьяков В. И. Металлокерамические твердые сплавы. М., «Металлургиздат», 1962. 592 с. с ил.

77. Уманский Я. С. Карбиды твердых сплавов. М., «Металлургиздат», 1947. 131 с. с ил.

78. *Физико-химические явления при взаимодействии алмазов и абразивов с металлами в процессах обработки.* Тбилиси, изд. ГПИ, 1971. 160 с. с ил.

79. *Фридман Я. Б.* Механические свойства металлов. Ч. I. М., «Машиностроение», 1974. 472 с. с ил.

80. *Чизов В. Н., Лебедев С. И.* Определение оптимального радиуса скругления режущих кромок твердосплавных резцов.— «Станки и инструмент», 1973, № 12, с. 21.

81. *Шепелев А. А.* Зависимость качества заточки инструмента от расположения и соотношения твердого сплава и стали.— «Синтетические алмазы», 1972, вып. 4, с. 8—10.

82. *Шьюман Н.* Диффузия в твердых телах. М., «Металлургия», 1966. 425 с. с ил.

✓ 83. *Электроалмазное шлифование инструментальных материалов.* Киев, «Вища школа», 1974. 118 с. Авт.: М. Ф. Семко, А. И. Грабченко, Н. В. Левченко, А. Ф. Раб.

84. *Якобсон М. О.* Шероховатость, наклеп и остаточные напряжения при механической обработке. М., Машгиз, 1956. 292 с. с ил.

85. *Cornely H., Kerbusch J., Schekulin K.* Untersuchung der Einflubgrößen anß die Schneide beim Anschleifen von Drehwerkzeugen — «Werkstatt und Betrieb», 1964, 97, № 11, s. 799—804.

86. *Duwell E., Mc., Donald W.* The wear and Sudrication of abrasive partikles used in grinding.— «Metalls Engug Quart», 1963, vol. 5, № 2, p. 56—62.

87. *Dyer R. H. and Roy A. P.* A new synthetic diamond grit.— «Industrial Diamond Review», 1963, v. 23, № 277, p. 284—290.

88. *Hoves U. P., Tolansky S.*— «Proc. Roy. Soc.», 1955, A230, № 1182, p. 287—297.

89. *Iason H.* Selection of Diamond Grinding — Wheels: Surface-Finishes and Diamond — Turningq — «Ancraft Production», 1963, 25, № 3, p. 70—73.

90. *Iason H.* Selection and economics of diamond grinding Wheels.— «Machinery», 1963, vol. 102, № 2627, p. 648—650.

91. *Industr. Diamond Review*, 1962, vol. 22, February, p. 39—45.

92. *Kohblanek* Schleifhilfsstoffe in weniger gelanfigen Zusammenhängen — «Fertigungs — tecnick und Betrieb», 1959. 9, № 5, s. 287—294.

93. *Pahlitzsch G. and Rafflenbent E.* Schleifen von Hartnutalsbzw Hartmetallschneiden mit Diamond — Schleifschben.— «Werkstatt und Bertieb», 1958, 41, № 5, s. 244—257.

94. *Pahlitzsch G.* Das Verhalten von Diamond Schlerfscheibe leeim Schleifen von Hartmetall.— «VDI Leitschreft», 1959, 101, № 25, s. 115.

95. *Pahlitzsch G.* Vergeichende Untersuchung von naturlichen und synthetische Diamankom C. I. R. P.— «Annalem», 1962, vol. 10. № 2, s. 106—113.

96. *Lindenbeek D. A.* Basic parameters for wet grinding with diamond wheels.— «Industrial Diamond Review», 1971, aet. p. 400—407.

97. *Skipvouman* Diamond wheels, which concentration? — «Grinding and FiniShing», 1961, v. 7, № 5.

98. *Seal Michael.* The wear of Diamond.— «Industrial Diamond Revi-ew», 1965, 25, № 297, p. 111—116.

99. *Seal M.* «Proc. Roy. Soc». 1958, A 248, № 1254, p. 379—393.

	Стр.
Предисловие	3
Глава I. Свойства алмаза и их влияние на процесс шлифования .	5
Алмаз и его основные свойства	5
Влияние свойств алмаза на процесс шлифования	11
Роль структуры алмазоносного слоя в процессе шлифования	16
Методы улучшения режущих свойств алмаза	18
Глава II. Физико-механическое взаимодействие алмазного зерна с обрабатываемым материалом	24
Разрушение обрабатываемого материала при воздействии единичных зерен алмаза	24
Явление адгезии и диффузии в контакте	35
Износ и работоспособность единичных алмазных зерен	40
Глава III. Физико-механическое взаимодействие алмазного круга с обрабатываемым материалом	52
Суммирование воздействий единичных зерен алмаза на обрабатываемый материал	52
Механизм износа алмазных кругов	63
Глава IV. Динамика и тепловые явления процесса алмазного шлифования	72
Силы резания	72
Источники тепла и температура алмазного шлифования	82
Роль тепловых явлений	92
Глава V. Работоспособность алмазных кругов	100
Критерии оценки работоспособности алмазных кругов	100
Анализ работоспособности алмазных кругов в различных условиях эксплуатации	104
Управление режущей способностью алмазных кругов	120
Глава VI. Качество поверхности и состояние поверхностного слоя	124
Формирование физического рельефа поверхности и поверхностного слоя	124
Шероховатость и острота режущих кромок инструмента	129
Особенности образования остаточных напряжений при шлифовании многофазных материалов	144
Глава VII. Эксплуатационные свойства изделий, обработанных алмазными кругами	155
Работоспособность режущего инструмента	155
Механическая прочность твердых сплавов	167
Термостойкость твердых сплавов	172
Список литературы	184

*Михаил Федорович Семко, д-р техн. наук,
Анатолий Иванович Грабченко, канд. техн. наук,
Александр Фомич Раб, канд. техн. наук,
Матвей Данилович Узунян, канд. техн. наук,
Михаил Спиридонович Пивоваров, канд. техн. наук.*

Основы алмазного шлифования

Редактор издательства *А. Л. Берзина*
Переплет художника *Б. И. Савченко*
Художественные редакторы *Г. П. Осмачко, Е. А. Ильницкий*
Технический редактор *С. В. Иванус*
Корректор *В. А. Брусило*

ИБ № 609

Сдано в набор 11.III.1977 г. Подписано в печать 18.VI.1977 г. БФ 05024.
Формат 84x108^{1/32}. Бумага типогр. № 2. Лит. гарн. Высокая печать.
Усл. печ. л. 10,08. Уч.-изд. л. 10,418. Тираж 6000 экз. Зак. 7-470.
Цена 1 руб. 20 коп.

Издательство «Техника», 252601, Киев, 1, ГСП, Пушкинская, 28.

Книжная фабрика «Коммунист» РПО «Полиграфкнига» Госкомиздата
УССР. 310012, Харьков-12, ул. Энгельса, 11.