

ФЕСЕНКО А.В., УШАКОВ, А.Н., ЕВСЮКОВА, Ф.М., СЛИПЧЕНКО С.Е.

ВЫБОР УСИЛИЯ РЕЗАНИЯ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ЗАДАНЫХ ПАРАМЕТРОВ ШЛИФОВАНИЯ

В статье рассмотрены вопросы влияния усилия резания на состояния рабочей поверхности шлифовального круга и шероховатость обработанной поверхности. Выполнен анализ разработанных ранее алгоритмов для управления круглошлифовальными станками, установлено, что данные алгоритмы не учитывают характеристики шлифовального круга, которые имеют существенное влияние на формирование шероховатости обработанной поверхности детали. Установлено, что качество обработки на начальном этапе цикла определяется интенсивностью правки шлифовального круга. Разработана иерархическая структура получения шероховатости, учитывающая характеристики шлифовального круга, параметры правки, параметры шлифования, непосредственно процесс шлифования с определением удельной силы резания. Получена расчетная зависимость удельной составляющей силы резания, учитывающая структуру цикла, этап шлифования и уровень достижимой шероховатости поверхности, а также характеристики шлифовального круга и условия обработки в виде суммарного поправочного коэффициента. Разработан алгоритм расчета удельной составляющей силы резания. Получены зависимости шероховатости поверхности при обработке сталей 45 и ШХ-15 кругами 91А и 24А для различных этапов цикла обработки. Установлен, характер износа шероховатости при работе после правки, так начальная шероховатость зависит от интенсивности съема металла и от режимов правки. Установлено, что для стабильного процесса шлифования режимы правки должны обеспечивать уровень шероховатости достижимый при выбранной интенсивности шлифования. Выполненные теоретические и экспериментальные исследования позволили определить допустимый уровень радиальной составляющей усилия резания при получении заданной шероховатости.

Ключевые слова: сила резания, шероховатость, врезная подача, шлифовальный круг, твердость, зернистость, связка, время обработки.

ФЕСЕНКО А.В., УШАКОВ О.М., ЄВСЮКОВА Ф.М., СЛІПЧЕНКО С.Є.

ВИБІР ЗУСИЛЛЯ РІЗАННЯ ПРИ ОТРИМАННІ ЗАДАНИХ ПАРАМЕТРІВ ШЛІФУВАННЯ

У статті розглянуті питання впливу зусилля різання на стани робочої поверхні шліфувального круга і шорсткість обробленої поверхні. Виконано аналіз розроблених раніше алгоритмів для управління круглошліфувальними верстатами, встановлено, що дані алгоритми не враховують характеристики шліфувального круга, які мають істотний вплив на формування шорсткості обробленої поверхні деталі. Встановлено, що якість обробки на початковому етапі циклу визначається інтенсивністю правки шліфувального круга. Розроблено ієрархічна структура отримання шорсткості, що враховує характеристики шліфувального круга, параметри правки, параметри шліфування, безпосередньо процес шліфування з визначенням питомої сили різання. Отримано розрахункова залежність питомої складової сили різання, що враховує структуру циклу, етап шліфування і рівень досяжної шорсткості поверхні, а також характеристики шліфувального круга і умови обробки в вигляді сумарного поправочного коефіцієнта. Розроблено алгоритм розрахунку питомої складової сили різання. Отримано залежності шорсткості поверхні при обробці сталей 45 і ШХ-15 кругами 91А і 24А для різних етапів циклу обробки. Встановлено, характер зносу шорсткості при роботі після правки, так початкова шорсткість залежить від інтенсивності знімання металу і від режимів правки. Встановлено, що для стабільного процесу шліфування режими правки повинні забезпечувати рівень шорсткості досяжний при обраної інтенсивності шліфування. Виконані теоретичні та експериментальні дослідження дозволили визначити допустимий рівень радіальної складової зусилля різання при отриманні заданої шорсткості.

Ключові слова: сила різання, шорсткість, врізна подача, шліфувальний круг, твердість, зернистість, зв'язка, час обробки.

FESENKO A.V., USHAKOV, A.N., EVSYUKOVA, F.M., SLIPCHENKO S.E.

SELECTION OF CUTTING EFFORT WHEN RECEIVING PRESET GRINDING PARAMETERS

The article questions of influence of effort of cutting on conditions of a working surface of a wheel and a roughness of the treated surface are considered. The analysis developed before algorithms for control of circular grinding machine tools is made, is established that the given algorithms do not consider performance of a wheel which have essential influence on shaping of a roughness of the treated surface of a detail. It is established that quality of handling at the cycle initial stage is defined by intensity of editing of a wheel. The hierarchical structure of deriving of the roughness, considering wheel performances, editing parameters, grinding parameters, immediately process of grinding with definition of specific force of cutting is developed. Settlement dependence of specific making force of the cutting, considering cycle structure, a stage of grinding and level of an accessible surface roughness, and also performance of a wheel and a condition of handling in the form of a total correction factor is received. Influence of editing for wheels 91A and 24A by which details from steels 45 and SH -15 were treated was examined, as a result established that roughness level under identical conditions of handling for circles 91A was above, than 24A. The algorithm of calculation of specific making force of cutting is developed. Dependences of a surface roughness are received at handling of steels 45 both SH -15 by circles 91A and 24A for various stages of an operation cycle. It is established, character of deterioration of a roughness at operation after editing so the initial roughness depends on intensity of a metal removal and from editing conditions. It is established that for stable process of grinding editing conditions should ensure roughness level accessible at the selected intensity of grinding. Executed theoretical and experimental researches have allowed to define admissible level of a radial component of effort of cutting at deriving of the set roughness.

Keywords: cutting force, roughness, mortise feed, grinding wheel, hardness, graininess, bond, processing time.

Введение. Состояние рабочей поверхности шлифовального круга зависят от характера износа абразивных зерен и во многом определяет качество обработки. Начальный повышенный износ образуется при удалении с рабочей поверхности круга дефектных по форме и неудачно ориентированных после правки зерен. В дальнейшем при шлифовании в зависимости от нагрузки на зерна износ может иметь характер выкрашивания зерен, скалывания отдельных

частиц, истирания с образованием площадок износа, засаливанием, при котором резания почти не происходит, а только идет интенсивный нагрев детали.

Литературный обзор. Характер расположения отдельных зон работы круга и его переход из одной области в другую в зависимости от твердости круга и зернистости (при постоянном режиме шлифования) см. рис. 1.

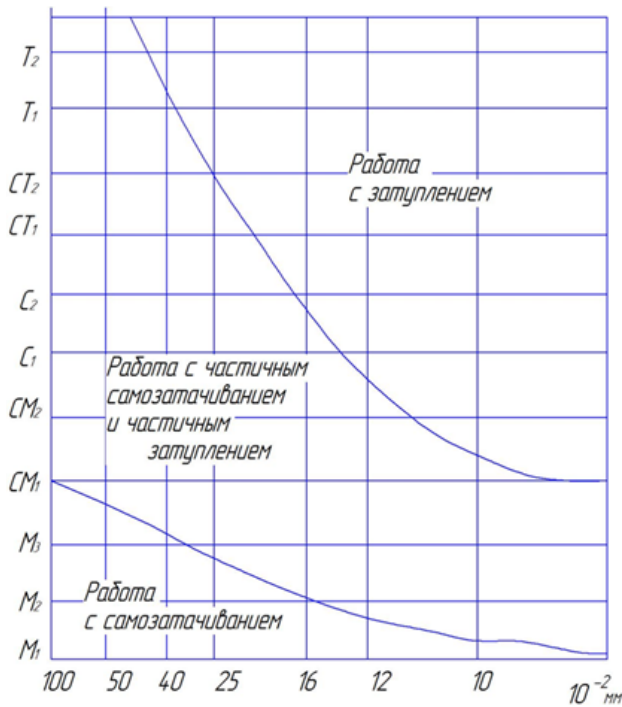


Рис. 1 – Изменение характера работы шлифовального круга

Для автоматизации циклов шлифования с получением заданного качества обработки в Опытном Конструкторском бюро шлифовальных станков (ОКБШС) были разработаны алгоритмы управления круглошлифовальными станками, в математическую модель которых закладывались определенные закономерности, по которым корректировались режимы резания при шлифовании. Однако алгоритмы ОКБШС не учитывали характеристику шлифовального круга, установленного на станке. А это, в свою очередь, не позволяет оценить её влияние на состояние рабочей поверхности круга и на выходные параметры процесса. В частности, на шероховатость.

В общем виде уравнение описывающее изменение шероховатости за время работы круга [2] представлено в виде:

$$R_a(\tau) = (R_{анач} - R_{асм})e^{-\lambda\tau} + R_{асм} \cdot e^{-\delta\tau}, \quad (1)$$

где $R_{анач}$ - высота микронеровностей в начале шлифования;

$R_{асм}$ - высота микронеровностей после приработки круга, в начале второго периода его работы;

δ - показатель степени, выражающий рост высоты микронеровностей в следствие затупления круга и вибраций в зоне резания;

λ - показатель степени, выражающий изменение микронеровностей в период приработки круга.

Использование этих данных [2] для расчета шероховатости позволяют проследить изменения R_a на деталях из закаленной стали 45 диаметром 60 мм при обработке кругом Э9А25С1 (рис.2).

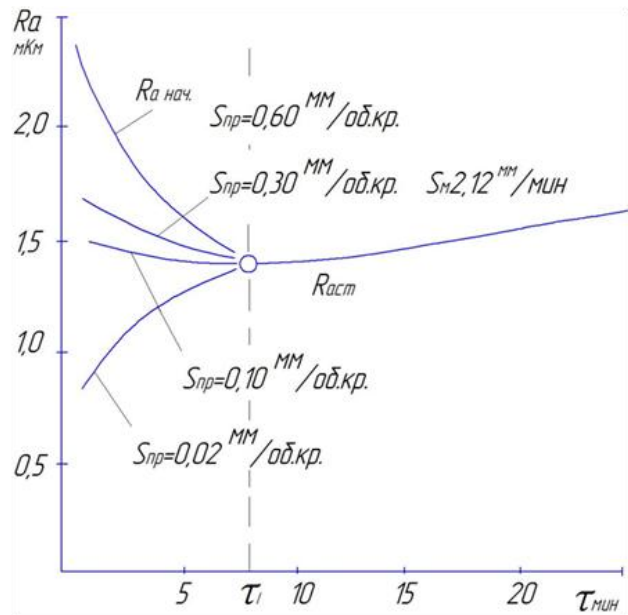


Рис.2 – Зависимость шероховатости от времени шлифов

Из графика видно, что при больших подачах алмаза при правке начальная шероховатость выше $R_{асм}$ и наоборот, при малых подачах правки $R_{анач} < R_{асм}$. Процесс стабилизируется при $\tau_1 = 8$ мин. Зависимость шероховатости и времени τ_1 от врезной подачи представлены на рисунке 3.

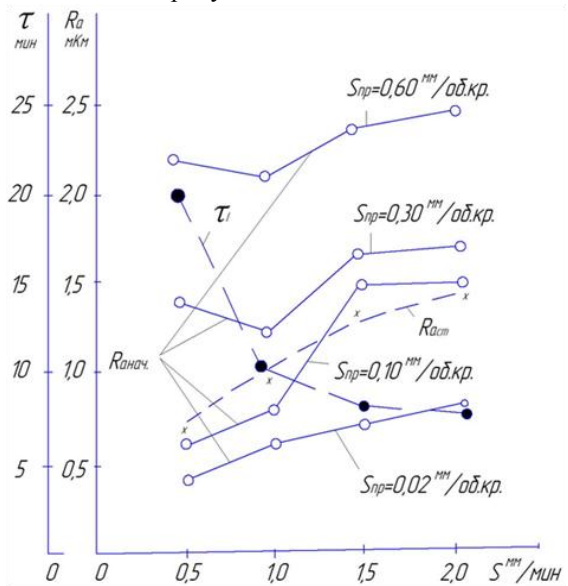


Рис.3 – Зависимость шероховатости и времени стабилизации процесса от врезной подачи

Из графиков видно, что шероховатость поверхности увеличивается с возрастанием интенсивности шлифования (подачи S_M), а время приработки τ_1 , при этом уменьшается. Это можно объяснить увеличением интенсивности износа круга с ростом подачи.

Анализируя графики можно сделать вывод, что для стабилизации процесса режимы правки следует выбирать такими, чтобы шероховатость поверхности в период приработки была близка к $R_{асм}$. В

рассмотренном примере это достигается при $S_{np}=0,08$ мм/об. Шероховатость обработанной поверхности может являться критерием при определении стойкости круга. Так, например, в работе [2] установлено отношение шероховатости в начале обработки к шероховатости в конце периода стойкости круга для стали 45 составляет 1,3.

Несмотря на многочисленные теоретические и экспериментальные исследования в настоящее время предварительный расчет высоты микронеровностей затруднен, из-за отсутствия обобщенных расчетных формул учитывающих различные условия шлифования. В отдельных случаях шероховатость поверхности детали может определяться по эмпирическим зависимостям для конкретного случая шлифования.

Основная часть. При анализе процесса шлифования было установлено, что качество обработки на начальном этапе цикла определяется интенсивностью правки. В дальнейшем при чистовых режимах шлифования происходит интенсивное истирание вершин абразивных зерен и переход от начального износа к затуплению, причем интенсивность износа уменьшается по мере увеличения длительности шлифования.

Исследование влияния режимов правки, выполнено по следующей методике. После правки шлифовального круга с подачами от 0,02 до 0,6 мм/на оборот круга выполнялась шлифовка детали со съемом 0,1 мм на диаметр. Контроль поверхности детали позволил определить величину начальной шероховатости. Уровень ее возрастает с увеличением скорости правки. На рисунке 4 показана зависимость Ra_0 от подачи при правке для незакаленной стали 45. При обработке кругом 91А, из графиков видно, что увеличение Ra_0 происходит при возрастании врезной подачи. Аналогичные зависимости получены при обработке закаленных сталей 45 и ШХ-15, для шлифования кругами 91А и 24А.

Эти данные представлены на графиках зависимости шероховатости от времени обработки. Установлено, что уровень шероховатости при одинаковых условиях обработки для кругов 91А был выше, чем 24А.

При дальнейшей работе круга шероховатость постепенно приближалась к установившемуся значению. Эта закономерность хорошо прослеживается при малых врезных подачах. Следовательно, для стабилизации шероховатости поверхности детали за период стойкости круга необходимо подачу правки принимать такой, чтобы начальная шероховатость была такой же, как шероховатость установившегося процесса обработки.

Повышение производительности шлифования связано с увеличением интенсивности обработки на черновом этапе. Без правки в цикле обработки черновая подача должна выбираться такой, чтобы шлифование протекало с гарантированным сохранением профиля круга, обеспечивающим в процессе последующей обработки заданный чертежом уровень шероховатости..

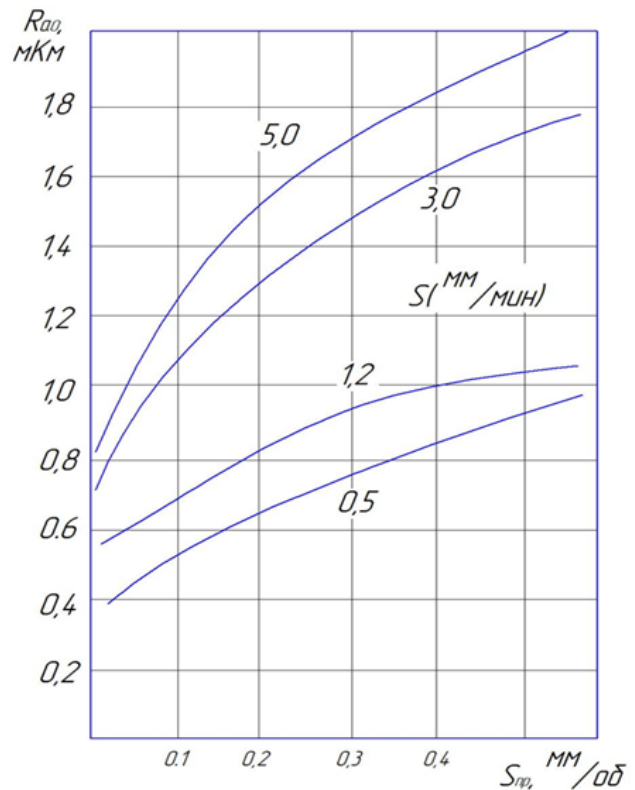


Рис.4 – Зависимость начальной шероховатости от подачи правки при обработке стали 45 (НЗК) кругом 91А

Взаимосвязь влияющих параметров показана на рисунке 5.

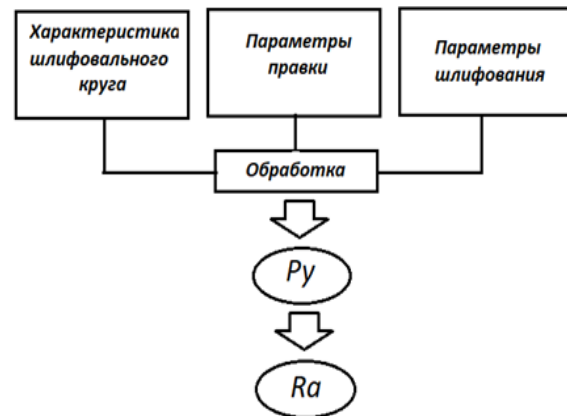


Рис.5 – Структура получения заданной шероховатости

При этом, нами предлагается, удельную силу резания для получения шероховатости определять по формуле:

$$P_y = K_{кр} \cdot C_u \cdot R_a, \quad (2)$$

где C_u - коэффициент, учитывающий структуру цикла, этап шлифования и уровень достижимой шероховатости поверхности,

$K_{кр}$ - коэффициент, учитывающий характеристику шлифовального круга и условия обработки.

Сопоставление ряда стойкостных зависимостей, влияния продолжительности шлифования с учетом затупления круга на шероховатость поверхности и сравнение этих данных с результатами проведенных нами экспериментальных проверок позволяют выполнить корректировку силовых зависимостей, используемых в алгоритмах выбора режимов шлифования.

Коэффициент $K_{кр}$ предлагается определять по формуле:

$$K_{кр} = K_A \cdot K_{ТВ} \cdot K_Z \cdot K_{СВ} \cdot K_D \cdot K_V \cdot K_{ТО} \cdot K_{\phi}, \quad (3)$$

где отдельные составляющие учитывают влияние абразивного материала (K_A), твердости шлифовального круга ($K_{ТВ}$), зернистости (K_Z), связки круга ($K_{СВ}$), диаметра шлифовального круга (K_D),

скорости круга (K_V), качества точности обрабатываемой детали ($K_{ТО}$), форму поверхности детали (K_{ϕ}).

На основании экспериментальных данных нами выполнены обобщения и получены расчетные зависимости вышеперечисленных коэффициентов.

Для введения в программу расчета были выполнены преобразования, в результате которых на основании графиков и использования кодирования параметров кругов были получены расчетные формулы для определения коэффициентов K_A , $K_{ТВ}$, $K_{СВ}$, для их дальнейшего использования при расчетах на ЭВМ.

Таблица 1 – Кодирование марки круга

Абразивный материал	14А	24А	25А	33А	44А	91А	92А
Код X_1	0	1	2	3	4	5	6

Таблица 2 – Код твердости круга

Твердость Ш.К.	МЗ	СМ1	СМ2	С1	С2	СТ1	СТ2	СТ3
Код X_2	0	1	2	3	4	5	6	7

Таблица 3 – Кодирование связки круга

Связка	Керамическая	Вулканитовая	Бакелитовая
Код X_3	0	1	2

Расчетная зависимость для K_A :

$$K_A = 1.05 - 0.01 \cdot (X_1 - 3)^2. \quad (4)$$

Кодирование твердости круга выполнялось по таблице 2

Расчетная зависимость для $K_{ТВ}$:

$$K_{ТВ} = 0.8 + 0.05 \cdot X_2. \quad (5)$$

При определении влияния зернистости (Z) использовали её величину

$$K_Z = 1.55 - 0.02 \cdot Z, \quad (6)$$

где Z – параметр зернистости (...16, 25, 40...)

Используемые в алгоритме зависимости соответствуют обработке шлифовальным кругом на керамической связке, т.е. $K_{СВ} = 1$.

При установке на станке кругов с другой связкой следует внести поправку, величина которой определяется коэффициентом $K_{СВ}$:

$$K_{СВ} = 1 + 0.2 \cdot X_3, \quad (7)$$

где X_3 – код связки, определяемый по таблице 3.

Влияние диаметра шлифовального круга $D_{кр}$ и его скорости $V_{кр}$ учитывается коэффициентами:

$$K_D = 0.0025 \cdot D_{кр}, \quad (8)$$

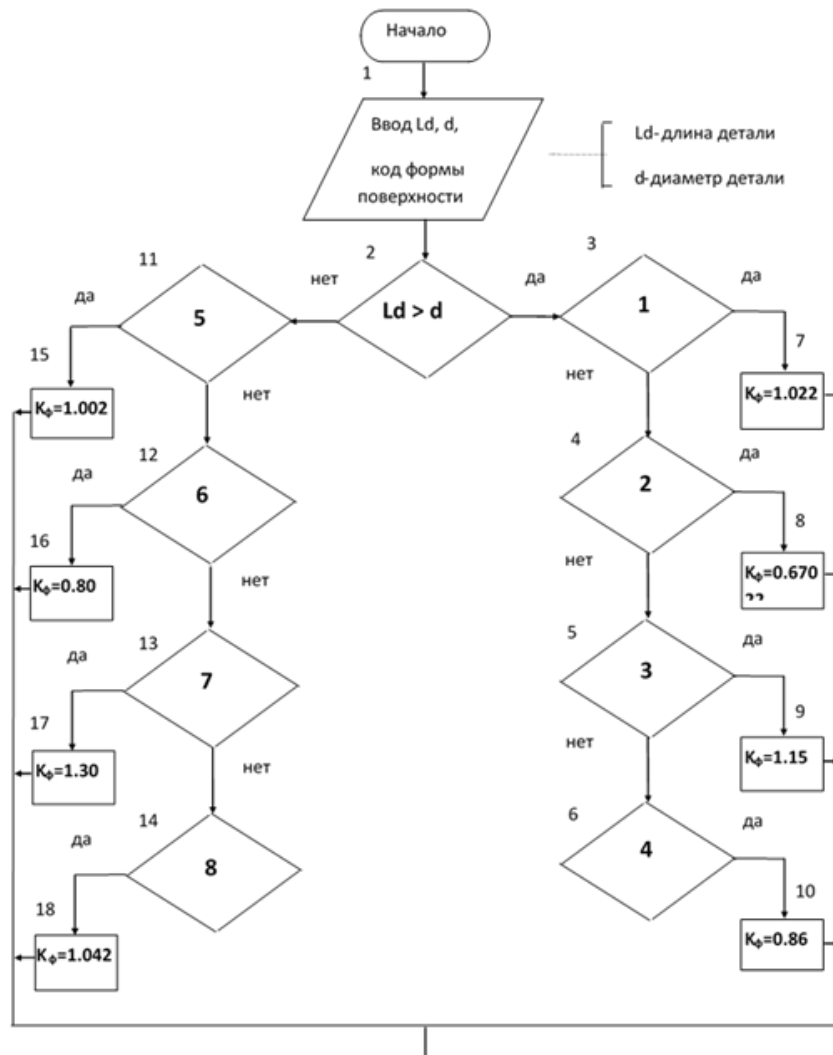
$$K_V = 0.37 \cdot V_{кр}^{0.23}. \quad (9)$$

Интенсивность износа шлифовального круга оказывает влияние на точность получаемой поверхности. В пределах точности, обеспечиваемой шлифованием (5-7 квалитет) поправочный коэффициент определяется зависимостью:

$$K_{ТО} = 0.19 \cdot H, \quad (10)$$

где H – квалитет детали.

Коэффициент учитывающий K_{ϕ} влияние формы поверхности детали выбирается по алгоритму рис.4. На рис.4 **1, 5** – код гладкой поверхности с канавкой у прилегающего бурта, **2, 6** – код гладкой поверхности с галтелью у прилегающего бурта, **3, 7** – код шлицевой поверхности с канавкой у прилегающего бурта, **4, 8** – код шлицевой поверхности с галтелью у прилегающего бурта. Для кодов **1-4** $Ld > d$, **5-8** $Ld \leq d$ (Рис.6).

Рис.6 – Алгоритм выбора коэффициента K_{ϕ} , учитывающего форму детали

Для примера выполним расчет коэффициента $K_{кр}$ для круга 25A25CM17K6 диаметром 600 мм при шлифовании гладкой поверхности детали при соотношении диаметра к длине <7 пятого квалитета точности:

$$K_{кр} = K_A \cdot K_{ТВ} \cdot K_Z \cdot K_{СВ} \cdot K_D \cdot K_V \cdot K_{ТО} \cdot K_{\phi} = 1.04 \cdot 0.85 \cdot 1.05 \cdot 1 \cdot 1.5 \cdot 0.9 \cdot 0.95 \cdot 1 = 1.19.$$

Предельное значение удельной силы резания ограничено переходом к режиму полного самозатачивания и осыпания, при котором изменяется рельеф рабочей поверхности шлифовального круга.

Методика определения шероховатости в двухступенчатом цикле шлифования включала в себя измерение поверхности детали после черновой обработки, с врезными подачами от 0,4 до 5,0 мм/мин и после чистового шлифования изношенным кругом с врезной подачей 0,1 мм/мин. Результаты исследований приведены на графиках.

При обработке с врезной подачей 0,4 мм/мин шероховатость поверхностей обработанных кругом 91А была выше, чем для круга 24А (рис.7,8,9). После приработки круга шероховатость поверхности стабилизировалась. В дальнейшем намечалось постепенное возрастание шероховатости. Переход к чистовому шлифованию позволил снизить высоту

микронеровностей поверхности детали. Во всех случаях шероховатость после чистового этапа находилась в пределах 0,4-0,5 мкм.

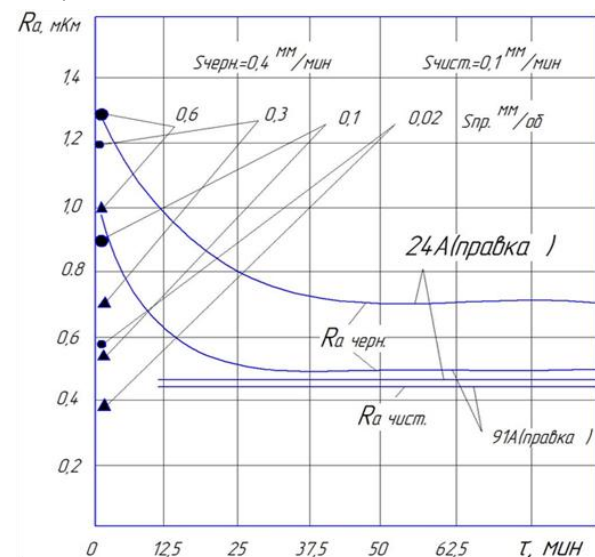


Рис.7 – Зависимость шероховатости поверхности от времени при обработке стали 45

(НЗК) после черного Ra и после чистового этапа

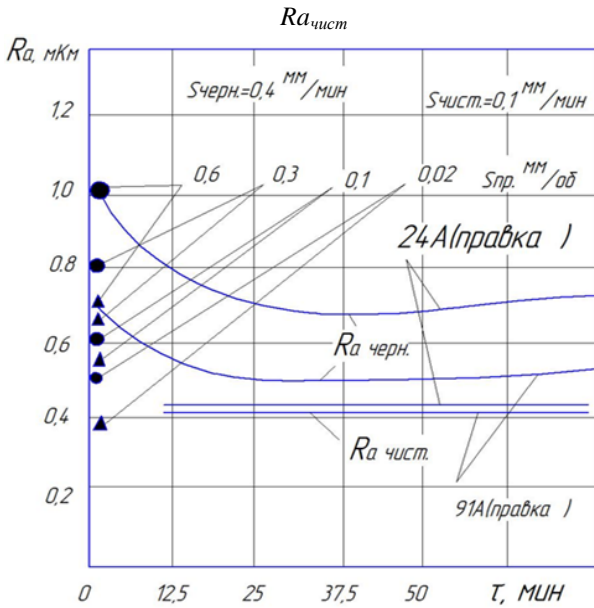


Рис.8 – Зависимость шероховатости поверхности от времени при обработке стали 45 (ЗК) после черного Ra и после чистового этапа $Ra_{чист}$

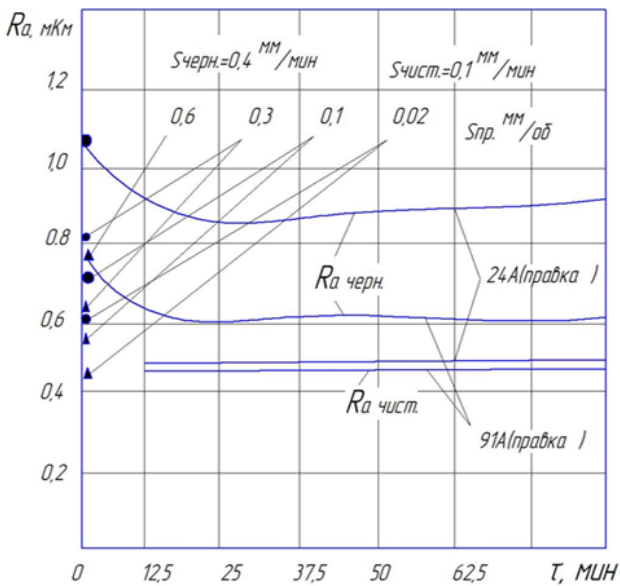


Рис.9 – Зависимость шероховатости поверхности от времени при обработке ШХ-15 (ЗК) после черного Ra и чистового этапа $Ra_{чист}$

При шлифовании с подачами 1,2 мм/мин шероховатость поверхностей обработанных кругами 91А выше чем 24А (рис.8,9). Причем интенсивность возрастания для кругов 91А выше. Так при шлифовании стали ШХ-15 на 17 минуте наблюдается резкое увеличение шероховатости.

Установлено, что характер износа аналогичен характеру изменения шероховатости при работе круга после правки. Начальная шероховатость зависит от интенсивности съема металла и от режимов правки. Со временем влияние правки постепенно уменьшается и при стабилизации износа шлифовального круга шероховатость поверхности детали в основном определяется режимами шлифования. На рисунке 1 приведен пример

изменения шероховатости на начальном этапе обработки.

В общем случае можно сделать выводы, что для стабильного процесса шлифования режимы правки должны обеспечивать уровень шероховатости достижимый при выбранной интенсивности шлифования.

Возможно также использование начального периода шлифования после правки. При этом (при $\tau \leq \tau_{СТАБ}$) шероховатость готовой детали в большей степени определяется режимами правки. Например, при правке круга в цикле, после черного съема металла, можно ожидать получения шероховатости, соответствующей режиму правки.

Установлено, что шероховатость поверхности увеличивается с возрастанием интенсивности шлифования (подачи S_M), а время приработки τ_1 , при этом уменьшается. Это можно объяснить увеличением интенсивности износа круга с ростом подачи.

Анализируя графики можно сделать вывод, что для стабилизации процесса режимы правки следует выбирать такими, чтобы шероховатость поверхности в период приработки была близка к $R_{акт}$. В рассмотренном примере это достигается при $S_{пр}=0,08$ мм/об. Шероховатость обработанной поверхности может являться критерием при определении стойкости круга. Так, например, в работе [2] установлено, что отношение шероховатости в начале обработки к шероховатости в конце периода стойкости круга для стали 45 составляет 1,3.

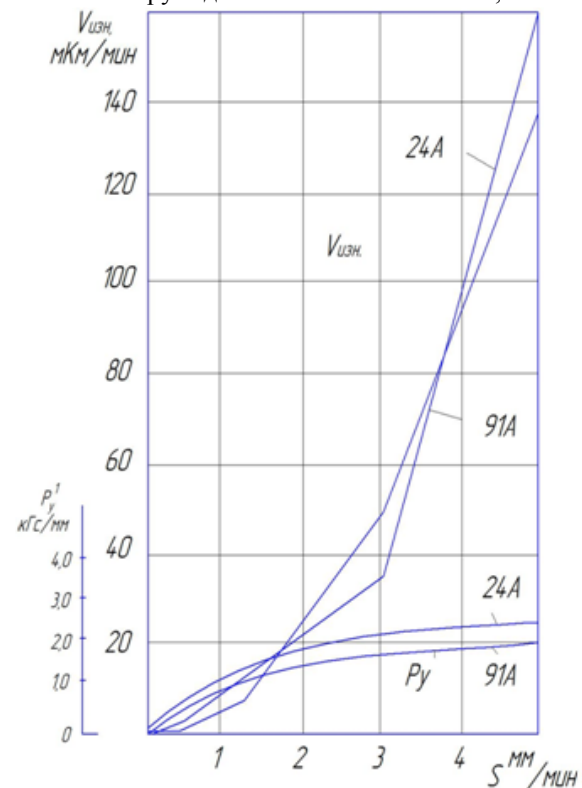


Рис.10 – Влияние врезной подачи на износ круга 25А25СМ17К6 при обработке стали 45 (ЗК)

Несмотря на многочисленные теоретические и экспериментальные исследования в настоящее время предварительный расчет высоты микронеровностей затруднен, из-за отсутствия обобщенных расчетных формул учитывающих различные условия шлифования. В отдельных случаях шероховатость поверхности детали может определяться по эмпирическим зависимостям для конкретного случая шлифования.

На рис.10 показаны графики зависимости изменения износа круга 25A25CM17K6 во времени при обработке стали 45 (ЗК). На этом же графике показано изменение удельной силы резания P_y .

Анализ зависимостей показывает, что с увеличением интенсивности износа ($P_y > 16$ Н/мм) замедляется возрастание силы резания, при этом происходит интенсивное самозатачивание зерен шлифовального круга. Следовательно, до $P_y = 16$ Н/мм возможно гарантированное получение шероховатости поверхности в зависимости от условий определяемых по формуле (2). Далее происходит интенсивный износ (осыпание) круга, поэтому на данном участке не возможно гарантировать получение требуемой шероховатости. Незначительный износ, характеризующийся пологим участком кривой $V_{изн}$ сохраняется до $P_y \approx 12$ Н/мм.

Вывод: Выполнены обобщения и кодировка расчетных зависимостей, с помощью которых в технологический алгоритм были внесены ряд параметров шлифовального круга и условий обработки. Это позволило определить допустимый уровень радиальной составляющей усилия резания при получении заданной шероховатости. Проведенные эксперименты подтвердили правильность сделанных вначале посылок о характере взаимосвязи усилий шлифования с изменением рабочего профиля шлифовального круга и шероховатостью обработанной поверхности.

Список литературы:

1. Якимов А. В. *Оптимизация процесса шлифования*. – Москва: Машиностроение, 1975. – 176 с.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Фесенко Анатолій Володимирович (Фесенко Анатолий Владимирович, Fesenko Anatoly Vladimirovich) – кандидат технічних наук, професор, кафедри технологія машинобудування і металорізальні верстати, Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел.: +38-067-577-28-87; e-mail: anfesenko73@gmail.com

Ушаков Олександр Миколайович (Ушаков Александр Николаевич, Uschakov Alexander Nikolaevich) – кандидат технічних наук, доцент кафедри технологія машинобудування і металорізальні верстати, Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел.: +38-097-882-22-11; e-mail: raom38@yandex.ua

Євсюкова Фатіма Магомедбіївна (Евсюкова Фатима Магомедбиевна, Evsyukova Fatima Magomedbievna) – доцент кафедри технологія машинобудування і металорізальні верстати, Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел.: +38-097-941-22-99; e-mail: fatimaevsukova@gmail.com

Сліпченко Сергій Євгенович (Слипченко Сергей Евгеньевич, Slipchenko Sergey Evgenievich) – старший викладач кафедри технологія машинобудування і металорізальні верстати, Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел.: +38-063-851-47-14; e-mail: serg.slip@gmail.com

2. Филимоиов Л.Н. *Стойкость шлифовальных кругов*. – Ленинград: Машиностроение, 1973. – 134 с.
3. Корчак С.Н. *Производительность процесса шлифования стальных деталей*. – Москва: Машиностроение, 1974. – 280 с.
4. Якимов А.В., Новиков Ф.В., Новиков Г. В., Серов Б. С., Якимов А.А. *Теоретические основы резания и шлифования материалов* : учебное пособие. – Одесса : ОГПУ, 1999. – 450 с.
5. Кремень З.И. *Технология шлифования в машиностроении* / В.Г. Юрьев, А.Ф. Бабошкин. – Санкт-Петербург: Политехника, 2007. – 425 с.
6. Старков В.К. *Шлифование высокопористыми кругами*. – Москва: Машиностроение, 2007. – 688 с.
7. Стратиевский И. Х. *Абразивная обработка* : справочник / В. Г. Юрьев, Ю. Н. Зубарев. – Москва: Машиностроение, 2010 – 352 с.
8. Malkin S., Guo C., *Grinding technology: Theory and applications of machining with abrasives* New York: Industrial Press 2008.

References (transliterated)

1. Yakimov A. V. *Optimizatsiya protsessy shlifovaniya* [Grinding process optimization]. – Moscow: Mechanical Engineering, 1975. – 176 p.
2. Filimoiiov L.N. *Stoykost' shlifoval'nykh krugov* [Resistance of grinding wheels]. – Leningrad: Mechanical Engineering, 1973. – 134 p.
3. Korchak S.N. *Proizvoditel'nost' protsessy shlifovaniya stal'nykh detaley* [Grinding performance of steel parts]. – Moscow: Mechanical Engineering, 1974. – 280 p.
4. Yakimov A.V., Novikov F. V., Novikov G. V., Serov B. S. and Yakimov A.A. *Teoreticheskiye osnovy rezaniya i shlifovaniya materialov* : *uchebnoye posobiye* [Theoretical Foundations of Cutting and Grinding of Materials: study guide]. – Odessa : OGPU, 1999. – 450 s.
5. Kremen' Z.I., Jur'ev V.G., Baboshkin A.F. *Tehnologiya shlifovaniya v mashinostroenii* [Grinding technology in mechanical engineering]. – Sankt-Peterburg: Politehnika, 2007. – 425 s.
6. Starkov V.K. *Shlifovanie vysokoporistymi krugami* [Grinding with highly porous circles]. – Moscow: Mechanical Engineering, 2007. – 688 p.
7. Stratievskij I.X., Jur'ev V.G., Zubarev Ju.N. *Abrazivnaya obrabotka: spravochnik* [Abrasive handling: the quick reference]. – Moscow: Mechanical Engineering, 2010. – 352 p.
8. Malkin S., Guo C., *Grinding technology: Theory and applications of machining with abrasives* New York: Industrial Press 2008.

Поступила (received) 21.05.2020