

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. №10 (148). С.30-38.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №10 (148). P.30-38.

Научная статья
УДК 621.7
doi: 10.30987/2223-4608-2023-30-38

Расчет высокопроизводительных циклов шлифования валков холодной прокатки на основе оптимизации цикла по радиальному усилию

Сергей Михайлович Братан¹, д.т.н.
Василий Игоревич Головин², к.т.н.
Ирина Александровна Дымченко³, аспирант
Юрий Константинович Новоселов⁴, д.т.н.

^{1, 2, 3, 4} Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

¹ serg.bratan@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9033-1174>

² golovin@mail.sevsu.ru, <https://orcid.org/0009-0009-8756-7715>

³ iadymchenko@mail.sevsu.ru, <https://orcid.org/0009-0002-0558-7907>

⁴ yknovoselov@mail.sevsu.ru, <https://orcid.org/0009-0008-6513-222X>

Аннотация. В настоящее время операция шлифования валков прокатных станов с использованием мелкозернистых кругов является наиболее прогрессивным методом финишной обработки, т. к. исключение трудоемких доводочных процедур из технологического цикла позволило обеспечить заданную точность размеров, формы, шероховатости поверхности, физико-механических свойств обрабатываемого материала, снизить трудоемкость изготовления изделий. Учитывая, что производительность шлифования мелкозернистыми кругами повышается с повышением глубины резания единичным зерном, рассмотрена методика расчета циклов шлифования по радиальному усилию для обработки поверхности валков холодной прокатки мелкозернистыми абразивными кругами. Проведен расчет, а также определены оптимальные режимы высокопроизводительного цикла шлифования деталей из стали 9Х2, 55...60 HRC, кругами 1-400x50x203 63С М14 СМ 8Б с изменением радиальной составляющей силы резания на этапах цикла. Для экспериментальной проверки рассчитанного цикла были проведены опыты по шлифованию образцов $d \times l = 65 \times 250$ мм при постоянном радиальном усилии, соответствующей заданной шероховатости поверхности и с изменением радиального усилия. Радиальное усилие шлифования задавалось натягом технологической системы и поддерживалось по прибору для регистрации радиального усилия в течение каждого прохода. При проведении опытов проводились замеры: съема металла на диаметр рычажной скобой; параметров шероховатости поверхности на профилометре-профилографе мод. 201. Проведенные испытания подтвердили эффективность применения расчетных циклов с изменением радиального усилия. При использовании предложенных циклов обеспечивается заданная шероховатость поверхности, при этом производительность операции увеличивается в 2,0 – 2,5 раза.

Ключевые слова: шлифование, валки холодной прокатки, операция, производительность, радиальная составляющая силы резания, мелкозернистые шлифовальные круги, режим шлифования

Для цитирования: Братан С.М., Головин В.И., Дымченко И.А., Новоселов Ю.К. Расчет высокопроизводительных циклов шлифования валков холодной прокатки на основе оптимизации цикла по радиальному усилию // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 10 (148). С. 30–38. doi: 10.30987/2223-4608-2023-30-38

Calculation of high-duty cold reduction rollers grinding cycles based on radial force cycle optimization

Sergey M. Bratan¹, D. Eng.
Vasily I. Golovin², PhD Eng.
Irina A. Dymchenko³, PhD student
Yuri K. Novoselov⁴, D. Eng.

^{1, 2, 3, 4} Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

¹ serg.bratan@gmail.com,

² golovin@mail.sevsu.ru,

³ iadymchenko@mail.sevsu.ru,

⁴ yknovoselov@mail.sevsu.ru

Abstract. Currently, the grinding operation of fabrication mill rollers through the use of fine-grained wheels is the most progressive method of finishing, because it saves from labor-intensive finishing processes in the technological cycle allowing to get a desired accuracy of the size, shape, surface roughness, physical and mechanical properties of the work material along with the reduction of manufacturing content. Considering that grinding rate of fine-grained wheels increases with an depth-of-cut increase in a single grain, the method of calculating grinding cycles by radial force for finishing of cold reduction rollers using fine-grained abrasive wheels is viewed. The calculation was carried out, and the optimal modes of a high-performance grinding cycle of parts made of steel 9X2, 55...60 HRC, wheels 1-400x50x203 63C M14 CM 8B with a change in the radial component of the cutting force at the cycle stages were determined. For experimental verification of the calculated cycle, grinding samples $d \times l = 65 \times 250$ mm at a constant radial force corresponding to a given surface roughness and with a change in radial force were tested. Radial grinding force was set by technological system tightness and maintained by a device for registering a radial force within each run. During the experiments, the following measurements: removal of metal to diameter with a lever bracket; surface roughness parameters on a profilometer-profilograph mod. 201 were carried out. The conducted tests proved the effectiveness of design cycles with a change in radial force. When using the proposed cycles, a given surface roughness is provided, while the productivity of the operation increases by 2,0 – 2,5 times.

Keywords: grinding, cold reduction rollers, operation, productivity, radial component of cutting force, fine-grained grinding wheels, grinding mode

For citation: Bratan S.M., Golovin V.I., Dymchenko I.A., Novoselov Yu.K. Calculation of high-duty cold reduction rollers grinding cycles based on radial force cycle optimization / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 10 (148). P. 30–38. doi: 10.30987/2223-4608-2023-30-38

Введение

В настоящее время в качестве финишных операций при изготовлении валков холодной прокатки используются процессы абразивной обработки, такие как шлифование и суперфиниширование [1]. Для исключения трудоемких доводочных процедур из технологического цикла в последнее время стали использовать процессы круглого наружного шлифования мелкозернистыми кругами, что позволило обеспечить заданную точность размеров, формы, шероховатости поверхности, физико-механических свойств обрабатываемого материала, снизить трудоемкость изготовления изделий [2]. В условиях серийного производства необходимо обеспечить шероховатость поверхности валка Ra не более 0,02 мкм, точность поверхности по пятому качеству. Большими проблемами для производства являются: определение числа операций шлифования деталей,

выбор характеристик шлифовальных кругов и назначение режимов шлифования [3]. Решение первых двух проблем подробно изложено в работах [4 – 7]. Сведения по назначению оптимальных режимов обработки для операции шлифования валков в литературе практически отсутствуют.

Целью данной работы является разработка методики расчета высокопроизводительных циклов шлифования валков холодной прокатки, на основе построения математических моделей и оптимизации цикла по радиальному усилию.

Материалы и методы

Известно, что производительность шлифования мелкозернистыми кругами повышается с повышением глубины резания единичным зерном.

В работе [9] показано, что производительность шлифования повышается с повышением интенсивности радиального усилия шлифования P_y / l_k . При шлифовании большинства металлов зависимость скорости врезания δ_M (радиальный съём за единицу времени) от интенсивности радиального усилия имеет вид прямой линии, проходящей через начало координат, при этом зависимость изменения шероховатости поверхности от интенсивности усилия шлифования выражается функцией вида:

$$Rz = b_0 \left(\frac{P_y}{l_k} \right)^{b_1}, \quad (1)$$

где b_0, b_1 – коэффициенты регрессии; P_y – радиальная составляющая силы резания; Π – припуск на шлифование; l_k – длина линии контакта шлифовального круга с заготовкой.

Максимально допустимая глубина резания единичным абразивным зерном h_{\max} при припуске на шлифование Π определится (рис. 1) по уравнению:

$$h_{\max} = \Pi - \delta + C_1 \cdot Rz_1, \quad (2)$$

где δ – радиальный съём материала; C_1 – коэффициент пропорциональности; Rz_1 – высота неровностей по десяти точкам (сумма средних абсолютных значений высот пяти наибольших выступов профиля и глубин пяти наибольших впадин профиля в пределах базовой длины).

Максимальная глубина резания единичным зерном при шлифовании соответствует наибольшей впадине текущей шероховатости поверхности Rz_T . Это выражается зависимостью:

$$h_{\max} = C_T \cdot Rz_T. \quad (3)$$

Подставляя значение Rz_T из уравнения (1) при $l_k = B$ в уравнение (3) и определяемое при этом h_{\max} в уравнение (2), получим:

$$\frac{P_y}{B} = \left(\frac{\Pi - \delta + C_1 \cdot Rz_1}{b_0 \cdot C} \right)^{\frac{1}{b_1}}, \quad (4)$$

где B – высота круга.

При работе круга в режиме самозатачивающего радиальный съём материала δ пропорционален скорости врезания и времени τ [10]:

$$\delta = a_0 P_y \tau / l_k, \quad (5)$$

где a_0 – коэффициент регрессии.

Подставляя в уравнения (5) значение $\frac{P_y}{B}$ из уравнения (4), запишем бесконечно малое приращение радиального съёма металла:

$$\left(\frac{b_0 \cdot C}{\Pi - \delta + C_1 \cdot Rz_1} \right)^{\frac{1}{b_1}} d\delta = a_0 d\tau. \quad (6)$$

Определяя δ из уравнения (6) и подставляя его в уравнения (4) получим зависимость изменения интенсивности радиального усилия шлифования от времени шлифования:

$$\frac{P_y}{B} = \left(\frac{b_0 \cdot b_1 \cdot C}{a_0 \cdot (1 - b_1) \cdot (A + \tau)} \right)^{\frac{1}{1 - b_1}}, \quad (7)$$

где A – постоянная интегрирования.

Уравнения (7) показывает, что для получения высокой производительности при шлифовании мелкозернистыми кругами, интенсивность радиального усилия $\frac{P_y}{B}$ должна снижаться по мере съёма припуска. В начальный период времени целесообразно работать с радиальным усилием, значительно превышающим усилие, при котором обеспечивается получение заданной шероховатости поверхности. Однако интенсивность усилия шлифования может быть повышена до определенной величины, определяемой прочностью абразивного зерна и прочностью закрепления его в круге.

В общем случае, когда снимаемый припуск Π больше поверхностного слоя, в котором распределена предварительная шероховатость, весь припуск под шлифование тонкозернистым кругом может быть разбит на три участка (см. рис. 1).

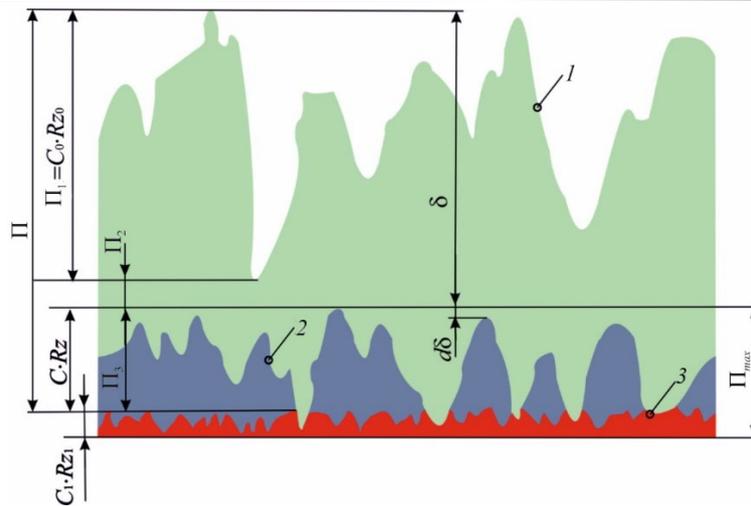


Рис. 1. К расчету высокопроизводительного цикла шлифования:

1 – предварительная шероховатость; 2 – текущая шероховатость поверхности; 3 – шероховатость поверхности после шлифования

Fig. 1. For the calculation of a high-performance grinding cycle:

1 – preliminary roughness; 2 – current surface roughness; 3 – surface roughness after grinding

Величина припуска первого участка равна слою, в котором распределена предварительная шероховатость поверхности $\Pi_1 = C_0 \cdot Rz_0$. В период удаления этого слоя меняется длина линии контакта круга с деталью [6]:

$$P_y = B \cdot [\sigma_y] \cdot [0,5 \pm \Phi(x)] \quad (8)$$

Переменная x в уравнении (8) определится на основе аппроксимации экспериментальных данных функцией плотности нормального распределения:

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{x^2}{2}} dx.$$

Показатель нормального распределения могут быть приняты равными:

$$\sigma = \frac{C_0 \cdot Rz_0}{6}; \quad \alpha = \frac{C_0 \cdot Rz_0}{2}.$$

Учитывая, что параметр E по функции плотности нормального распределения характеризующий изменение длины линии контакта

$E = \sum_{i=1}^n l_i / l$ – определяется по уравнению:

$$E = 0,5 \pm \Phi(x),$$

где «+» – при $x > 0$; «-» – при $x < 0$, переменная величина x может быть вычислена по уравнению:

$$x = \frac{6y}{C_0 \cdot Rz_0} - 3 = \frac{6(\delta + C \cdot Rz)}{C_0 \cdot Rz_0} - 3. \quad (9)$$

При подстановке в уравнение (9) значение δ из уравнения (8) и значения Rz из уравнения (1) при $P_y / l_k = [\sigma_y]$:

$$x = \frac{6(a_0 \cdot [\sigma_y] \cdot \tau + C \cdot b_0 \cdot [\sigma_y]^{b_1})}{C_0 \cdot Rz_0}. \quad (10)$$

Графически изменение радиального усилия шлифования на первом участке цикла представлено на рис. 2 линией АД'.

Ко второй части припуска может быть отнесен слой металла Π_2 , лежащий под слоем предварительной шероховатости поверхности и сошлифуемый при максимально допустимой интенсивности радиального усилия шлифования. В период удаления этого слоя длина линии контакта круга с деталью не меняется и равна длине круга. Радиальное усилие сохраняется постоянным и может быть определено по уравнению (8), т. к. параметр E при $\delta > C_0 \cdot Rz_0$ мало отличается от единицы.

После съема основной части припуска $\Pi_1 + \Pi_2$ радиальное усилие шлифования должно быть уменьшено до усилия, при котором обеспечивается заданная шероховатость поверхности. При этом участке цикла снимается оставшаяся часть припуска Π_3 .

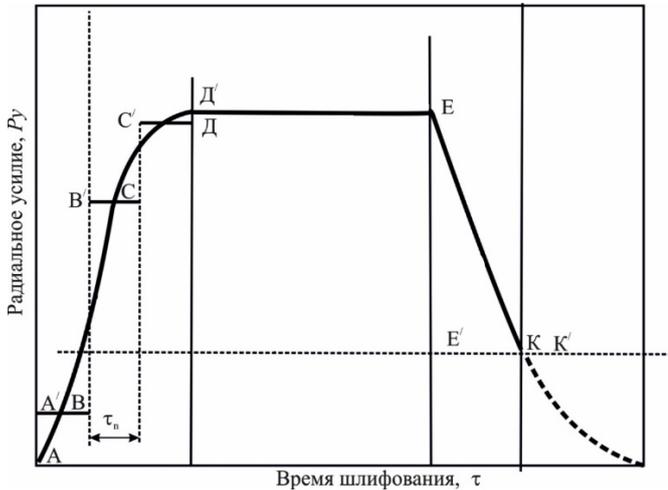


Рис. 2. Высокопроизводительные циклы шлифования мелкозернистыми кругами по радиальному усилию шлифования

Fig. 2. High-performance grinding cycles with fine-grained wheels according to the radial grinding force

Снижение радиального усилия шлифования на третьем участке цикла определяется по уравнению (7). Графически изменение радиального цикла представлено на рис. 2 линией ЕК.

При шлифовании с продольной подачей радиальное усилие может быть изменено только в начале или конце прохода. Рассмотрим особенности контакта круга с деталью в период удаления первой части припуска при наличии продольной подачи. В этом случае (рис. 3) линия касается круга с деталью не параллельна обрабатываемой поверхности (линия АВ). Условия контакта круга с деталью изменяются не только по мере съема предварительной шероховатости поверхности, но и по высоте круга. При шлифовании с максимально допустимой интенсивностью радиального усилия шлифования, линия АВ будет прямой. Элементарное приращение длины линии контакта круга с деталью (рис. 3), принимая параметр E при бесконечно малом приращении H постоянным определяется:

$$dl_K = dH \cdot E. \quad (11)$$

Из подобия треугольников $A'B'C'$ и ABC определим:

$$dH = \frac{B}{\delta_n} d\delta, \quad (12)$$

где δ – слой металла, снимаемый за один проход, определяется по уравнению (5) при $P_y / l_K = [\sigma_y]$ и $\tau = \tau_n$:

$$\delta_n = a_0 \cdot [\sigma_y] \cdot \tau_n. \quad (13)$$

Учитывая, что мощность, развиваемая электродвигателем, должна быть больше мощности требуемой по тангенциальному усилию шлифования:

$$P_z \cdot v_K \leq N_{\Sigma} \cdot \eta, \quad (14)$$

где N_{Σ} – мощность электродвигателя привода круга, кВт; η – коэффициент полезного действия передачи.

Тангенциальное усилие шлифования может быть выражено через факторы режима шлифования уравнением:

$$P_z = C_z \cdot v_K^{W_z} \cdot v_{II}^{X_z} \cdot S^{Y_z} \cdot t_M^{Z_z}. \quad (15)$$

Подставляя в неравенство (15) значение из уравнения (14) после преобразования получим:

$$v_K^{W_z} \cdot v_{II}^{X_z} \cdot S^{Y_z} \cdot t_M^{Z_z} \leq \frac{N_{\Sigma} \cdot \eta}{C_z}. \quad (16)$$

где v_K, v_{II} – окружная скорость круга и скорость заготовки; S – продольная подача; t_M – глубина резания; W_z, X_z, Y_z, Z_z – показатели степени.

Определяя l_K (11) из уравнения (12), (10), (9) и (13) и подставляя его значение в неравенство (16), получим при знаке равенства уравнение для расчета радиального усилия шлифования каждого прохода P_{y_i} на первом и втором участках цикла:

$$P_{y_i} = \frac{B \cdot [\sigma_y] \cdot C_0 \cdot Rz_0}{6\delta_n} \cdot \int_{x_i}^{x_{i+1}} [0,5 \pm \Phi(x)] dx, \quad (17)$$

где x_i и x_{i+1} – значения переменной x для начала i -го $i+1$ -го проходов.

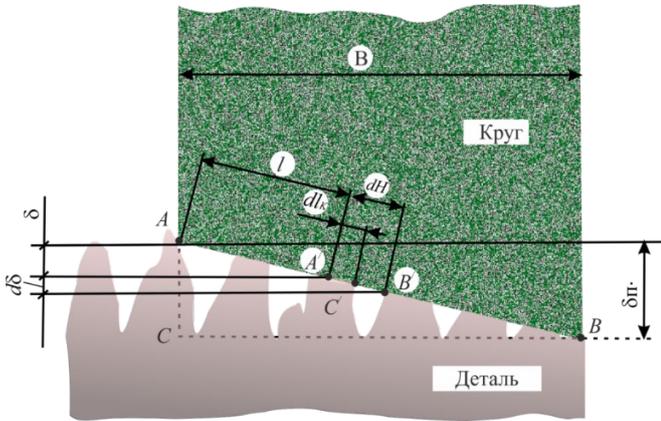


Рис. 3. Контакт тонкозернистого круга с деталью при шлифовании с продольной подачей

Fig. 3. Contact of a fine-grained wheel with a part in longitudinal-feed grinding

На третьем участке цикла радиальное усилие шлифования может быть изменено также как на первом и втором участках, периодически. При непосредственном снижении усилия с усилия второго участка цикла до усилия, при котором обеспечивается заданная шероховатость поверхности, число проходов j на третьем участке цикла определится (см. рис. 1) по уравнению:

$$j = \frac{\Pi_3}{\delta'_n} = \frac{C_\sigma \cdot Rz_\sigma - C_1 \cdot Rz_1}{\delta'_n}, \quad (18)$$

где Π_3 – слой металла, снимаемый за проход на усилии третьего участка цикла, определяется из уравнения (5) при подстановке вместо P_y / l_K его значения из уравнения (1) при $Rz = Rz_1$; C_σ и Rz_σ – шероховатость поверхности и коэффициент неоднородности шероховатости второго участка цикла.

Rz_σ определяется из уравнения (5) при $P_y / l_K = [\sigma_y]$

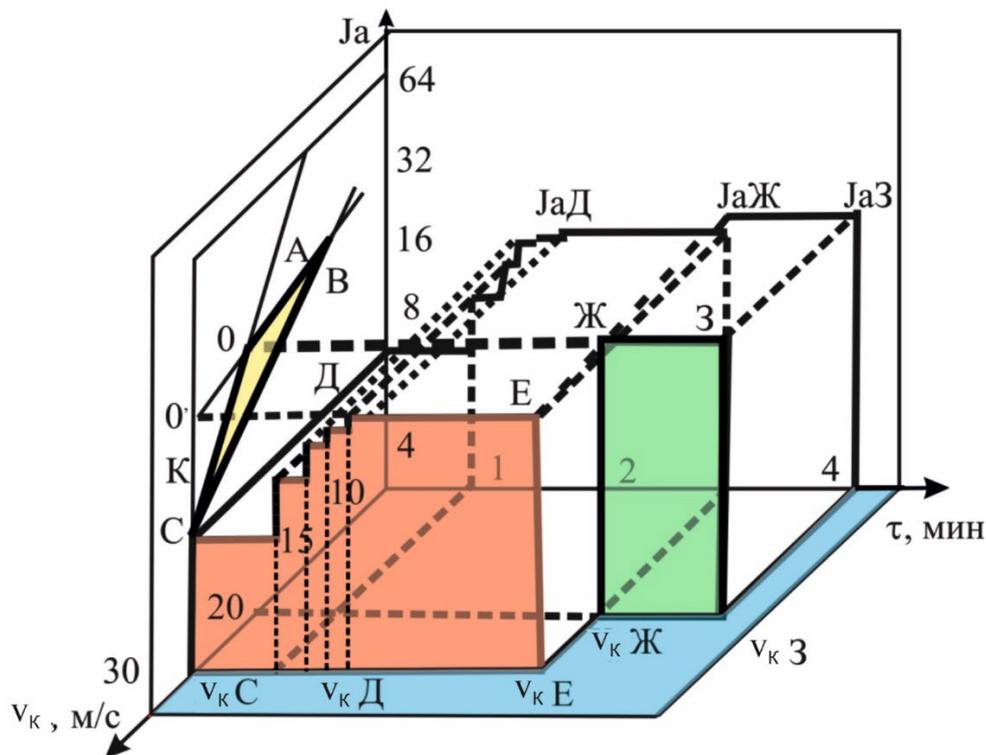


Рис. 4. Высокопроизводительный цикл шлифования валков с изменением нагрузки на электродвигатель привода круга и скорости круга

Fig. 4. High-performance grinding cycle of rollers with a change in the load on the electric motor of the wheel drive and the speed of the wheel

Подставляя в уравнение (19) значения Rz_σ и δ'_n получим:

$$j = \left(C_\sigma \cdot b_0 \cdot [\sigma_y]^{b_1} - C_1 \cdot Rz_1 \right) / \left(a_0 \cdot (Rz_1 / b_0)^{b_1} \cdot \tau_n \right). \quad (19)$$

Графически высокопроизводительный цикл при шлифовании мелкозернистыми кругами с продольной подачей на рис. 4 представлен ломаной линией А'ВВ'СС'ДД'ЕЕ'К'.

Пример расчета цикла и его экспериментальная проверка. Рассмотрим пример расчета высокопроизводительного цикла шлифования деталей из стали 9Х2, HRC = 55...60, кругами 1-400×50×203 63С М14 СМ 8Б. Размеры детали $d \times l = 65 \times 250$ мм, припуск на шлифование $\Pi = 0,03$ мм. Предварительная шероховатость поверхности соответствует $Rz_0 = 6,0$ мкм. Шероховатость после шлифования должна соответствовать $Rz_1 = 6,0$ мкм. Коэффициенты неоднородности шероховатости $C = C_0 = C_1 = C_\sigma = 2$. Шлифование ведется с продольной подачей $S = 0,4$ м/мин, допустимая интенсивность радиального усилия шлифования P_y / l_K для круга 63С М14 СМ 8Б, определенная экспериментально по радиальному усилию, при котором наблюдалось осыпание круга, равна 15 Н.

Дополнительными опытами при шлифовании образцов без предварительной шероховатости были установлены следующие эмпирические зависимости изменение радиального съема металла и шероховатости поверхности

от интенсивности радиального усилия шлифования:

$$\delta = 1,07 \left(\frac{P_y}{l_K} \right) \cdot \tau, \text{ мкм};$$

$$Rz = 0,4 \left(\frac{P_y}{l_K} \right)^{0,19}, \text{ мкм}.$$

Откуда в соответствии с уравнениями (5) и (1), коэффициенты регрессий равны: $a_0 = 1,07$; $b_0 = 0,4$; $b_1 = 0,19$.

Подставляя в уравнение (17) вместо коэффициентов и постоянных их значения и расчленив пределы интегрирования, определим изменение радиального усилия шлифования на первых двух участках цикла:

$$P_y = 60 \left[\int_{-3}^{x_{i+1}} [0,5 \pm \Phi(x)] dx - \int_{-3}^{x_i} [0,5 \pm \Phi(x)] dx \right], \quad (20)$$

где x – определится из уравнения (10); $x = 8,03$; $\tau = 2,32$.

Данные по значениям x_i ; x_{i+1} ; $\int_{-3}^{x_i} [0,5 \pm \Phi(x)] dx$; $\int_{-3}^{x_{i+1}} [0,5 \pm \Phi(x)] dx$ и значениям P_y приведены в табл. 1.

1. Расчетные значения параметров

1. Calculated values of parameters

Номер участка цикла	Номер прохода	x_{i+1}	x_i	$\int_{-3}^{x_{i+1}} [0,5 \pm \Phi(x)] dx$	$\int_{-3}^{x_i} [0,5 \pm \Phi(x)] dx$	$P_y, \text{ Н}$
1	1	+2,64	-2,32	2,63	0,003	158
2	2	+7,63	+2,64	7,99	2,638	300
2	3	+12,63	+7,63	12,998	7,998	300
3	4	-	-	-	-	97

На третьем участке цикла (четвертый проход) радиальное усилие должно быть снижено до усилия, обеспечивающего получение

заданной шероховатости поверхности. Определяется из уравнения (1) при $Rz_1 = 0,50$ мкм, $P_y = 97$ Н (табл. 2).

Число проходов на третьем участке цикла определяется по уравнению (19) $j = 0,18$. Принимаем $j = 1,0$ (см. табл. 1).

Для экспериментальной проверки рассчитанного цикла были проведены опыты по шлифованию образцов $d \times l = 65 \times 250$ мм на станке RSM M500 В CNC при постоянном радиальном усилии, соответствующей заданной шероховатости поверхности $P_y = 100$ Н и с изменением радиального усилия по радиальное усилие циклу. Радиальное усилие шлифования задавалось натягом технологической системы и поддерживалось по прибору для регистрации

радиального усилия в течение каждого прохода постоянными с точностью ± 20 Н.

При проведении опытов проводились замеры: съема металла на диаметр рычажной скобой, с ценой деления 0,001 мм; шероховатости поверхности Ra , мкм, на профилометре-профилографе мод. 201.

Повторность опытов при радиальном усилии $P_y = 100$ Н и при изменении радиального усилия по циклу была принята равной девяти. Усредненные данные по производительности шлифования, шероховатости поверхности и машинному времени обработки образца приводятся в табл. 2.

2. Усредненные данные по производительности шлифования, шероховатости поверхности и машинному времени обработки образца

2. Averaged data on grinding rate, surface roughness and machining-cycle time of the sample

Радиальное усилие P_y , Н	Производительность Q_M , мм ³ /мин	Шероховатость поверхности Ra , мкм	Машинное время T_M , мин
100	250	0,112	6,2
Изменяется по циклу	720	0,114	2,5

Заключение

Предложенная методика позволяет рассчитать высокопроизводительный цикл шлифования мелкозернистыми кругами. Проведенные эксперименты подтверждают эффективность применения расчетных циклов, так данные табл. 2 показывают, что при изменении радиального усилия шлифования по циклу при высокой производительности процесса достигается заданная шероховатость поверхности. При шлифовании с постоянным радиальным усилием $P_y = 100$ Н машинное время шлифования детали в 2,5 раза выше, чем при шлифовании с изменением радиального усилия по рассчитанному циклу.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Malkin S., Guo C. *Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives*. New York: Industrial Press, 2008. 372 p. ISBN 978-0-8311-3247-7.
2. Суслов А.Г., Шалыгин М.Г., Кузнецов С.В. Исследование поверхностей с различной механической

обработкой на уровне субшероховатости // Научные технологии в машиностроении. 2015. № 9 (51). С. 45–47.

3. Bratan S., Roshchupkin S., Kharchenko A., Belousov S. Quality improvement of manufacturing rolling mill rolls, CIS Iron and Steel Review. Metallurgical Equipment. 2021. Vol. 22. P. 26–31. doi: 110.17580/cisisr.2021.02.05.

4. Носенко В. А., Федотов Е. В., Даниленко М. В. Математическое моделирование распределения вершин зерен при шлифовании в результате различных видов изнашивания с использованием марковских случайных процессов // МНИЖ. 2015. № 2-1 (33).

5. Bratan S., Ságová Z., Sága M., Yakimovich B., Kuric I. New Calculation Methodology of the Operations Number of Cold Rolling Rolls Fine Grinding/ Applied Sciences (Switzerland), 2023, 13 (6), 3484. <https://doi.org/10.3390/app1306348>

6. Братан С.М., Дымченко И.А., Головин В.И., Новоселов Ю.К. Методика расчета числа операций при тонком шлифовании валков холодной прокатки и ее экспериментальная проверка // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2023. № 2 (358). С. 90–106.

7. L. Godinoa, I. Pomboa, J.A. Sanchez, J. Alvarez. On the development and evolution of wear flats

in microcrystalline sintered alumina grinding wheels, Journal of Manufacturing Processes. 2018. Vol. 32. P. 494–505.

8. **Братан С.М., Рощупкин С.И., Часовитина А.С., Гупта К.** Влияние на вероятность удаления материала относительных вибраций абразивного инструмента и заготовки при чистовом шлифовании // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2022. Т. 24. № 1. С. 33–47. DOI 10.17212/1994-6309-2022-24.1-33-47.

9. **Корчак С.Н.** Производительность процесса шлифования стальных деталей. М.: Машиностроение, 1974. 280 с.

10. **Bratan S., Roshchupkin S., Chasovitina A.** The correlation of movements in the technological system during grinding precise holes, 2021, Materials Science Forum, 1037 MSF, pp. 384–389. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1037.384

REFERENCES

1. Malkin S., Guo C. Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives. New York: Industrial Press, 2008. 372 p. ISBN 978-0-8311-3247-7.

2. Suslov A.G., Shalygin M.G., Kuznetsov S.V. Investigation of different machined surfaces for studying the level of sub-roughness // Science intensive technologies in mechanical engineering, 2015, No. 9 (51), pp. 45–47.

3. Bratan S., Roshchupkin S., Kharchenko A., Belousov S. Quality improvement of manufacturing rolling mill rolls, CIS Iron and Steel Review. Metallurgical Equipment. 2021. Vol. 22. P. 26–31. doi: 110.17580/cisisr.2021.02.05.

4. Nosenko V. A., Fedotov E. V., Danilenko M. V. Mathematical modeling of grain vertex distribution during grinding as a result of various types of wear using Markov random processes. IRJ, 2015, No. 2-1 (33).

5. Bratan S., Ságová Z., Sága M., Yakimovich B., Kuric I. New Calculation Methodology of the Operations Number of Cold Rolling Rolls Fine Grinding/ Applied Sciences (Switzerland), 2023, 13(6), 3484. <https://doi.org/10.3390/app1306348>

6. Bratan S.M., Dymchenko I.A., Golovin V.I., Novoselov Yu.K. Methodology for calculating the number of operations during fine grinding of cold reduction rollers and its experimental verification // Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology, 2023, No. 2 (358). pp. 90–106.

7. L. Godinoa, I. Pomboa, J.A. Sanchez, J. Alvarez. On the development and evolution of wear flats in microcrystalline sintered alumina grinding wheels, Journal of Manufacturing Processes. 2018. Vol. 32. P. 494–505.

8. Bratan S.M., Roshchupkin S.I., Chusovitina A.S., Gupta K. The effect of the relative vibrations of the abrasive tool and the workpiece on the probability of material removing during finishing grinding // Metalworking (technology, equipment, tools), 2022, vol. 24, No. 1, pp. 33–47. DOI 10.17212/1994-6309-2022-24.1-33-47.

9. Korchak S.N. Productivity of the grinding process of steel parts. Moscow: Mashinostroenie, 1974, 280 p.

10. Bratan S., Roshchupkin S., Chasovitina A. The correlation of movements in the technological system during grinding precise holes, 2021, Materials Science Forum, 1037 MSF, pp. 384–389. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1037.384

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 31.07.2023; одобрена после рецензирования 17.08.2023; принята к публикации 21.08.2023.

The article was submitted 31.07.2023; approved after reviewing 17.08.2023; assepted for publication 21.08.2023.