

УДК 621.923

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ ВОЗМУЩАЮЩИХ ФАКТОРОВ  
НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКУЮ СИСТЕМУ В ПРОЦЕССЕ ШЛИФОВАНИЯ**

В.Б. Богуцкий

**ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF SEPARATE DISTURBING FACTORS ON THE  
TECHNOLOGICAL SYSTEM DURING GRINDING**

V.B. Bogutsky

**Аннотация.** В статье рассматриваются вопросы обеспечения точности при обработке на шлифовальных станках. Отмечается, что на технологический процесс шлифования воздействует значительное количество возмущающих факторов, приведены основные возмущающие факторы, воздействующие на технологическую систему при шлифовальной обработке. Выполнен анализ влияния на технологический процесс шлифования скорости износа шлифовальных кругов и упругих деформаций технологической системы. Показано, что в большинстве случаев в пределах цикла обработки одного изделия размерным износом круга можно пренебречь и учитывать только изменения скорости износа круга за период его стойкости, а изменения упругих деформаций технологической системы за счет уменьшения диаметра шлифовального круга в пределах периода его стойкости весьма существенны.

**Ключевые слова:** *шлифование; возмущающие факторы, скорость износа шлифовального круга, упругие деформации технологической системы.*

**Abstract.** The article discusses the issues of ensuring accuracy when processing on grinding machines. It is noted that the technological process of grinding is affected by a significant number of disturbing factors, the main disturbing factors affecting the technological system during grinding are given. The analysis of the influence on the technological process of grinding of the wear rate of grinding wheels and elastic deformations of the technological system is carried out. It is shown that in most cases, within the processing cycle of one product, the dimensional wear of the wheel can be neglected and only changes in the wear rate of the wheel over the period of its durability can be taken into account, and changes in the elastic deformations of the technological system due to a decrease in the diameter of the grinding wheel within the period of its durability are very significant.

**Key words:** *grinding; disturbing factors, wear rate of the grinding wheel, elastic deformations of the technological system.*

**Введение**

Как показано в [1-4 и др.] в условиях реального производства на процесс механической обработки оказывает влияние значительное количество возмущающих факторов, различающихся по своей природе, характеру проявления и степени воздействия на технологическую систему (ТС). При анализе возмущающих факторов, прежде всего, необходимо выявить их характер проявления и степень влияния на технологическую систему. Если возмущения действуют систематически и закономерность их воздействия сравнительно простая, то управление процессом можно осуществить с помощью системы автоматического управления (САУ), без охвата технологической системы обратной связью. В этом случае можно обеспечить возможность выполнения технологической операции в соответствии с требуемой программой изменения регулируемой величины за счет изменения входных сигналов. Подобные решения реализуются и при низких (несущественных) уровнях воздействия возмущающих факторов, поскольку при этом ошибка регулируемой величины может сохраняться в допусках границах и без наличия обратной связи. В случае, если возмущающие воздействия на технологическую систему носят случайный характер или функция их изменения до-

статочно сложна и корректировка входного сигнала невозможна, управлять регулируемой величиной возможно лишь с применением САУ с обратной связью.

### **Изложение основного материала**

На технологический процесс шлифования воздействует значительное количество возмущающих факторов, различающихся по своему источнику, характеру проявления и степени влияния. Причины возникновения возмущений могут быть различными. Одни из них обусловлены особенностями технологии изготовления шлифовальных кругов и связанными с этим изменениями линейного и размерного износа кругов, а также изменениями их режущей способности [5-7 и др.]. Другие обусловлены особенностями, а частично и несовершенством конструкции шлифовальных станков и технологической оснастки (наличие люфтов в отдельных узлах станка, недостаточная жесткость технологической системы, неточность установки изделий и т. п.) [1, 2, 7-10 и др.]. Третьи обусловлены колебаниями параметров деталей, поступающих на обработку (по геометрии, по физико-химическим свойствам и др.) [1, 2, 10-12 и др.]. Четвертые связаны с изменениями внешних, окружающих условий, в которых протекает процесс (колебания температуры окружающего воздуха, изменение химического состава и величины расхода СОТС, колебания напряжения в электросети, наличие (или отсутствие) вибрационного воздействия от работы соседнего оборудования, и т.д.) [2-5, 12-14 и др.].

По характеру проявления возмущающие воздействия разделяют на систематические, периодические и случайные.

К систематическим возмущениям относят возникающие в ТС упругие и температурные деформации, износ шлифовального круга, погрешность базирования обрабатываемых деталей в технологической оснастке и др. Эти воздействия закономерно меняются (или являются постоянной величиной) в зависимости от варьирования режимов резания, размера шлифовального круга, износа установочных деталей технологической оснастки и т.п.. К случайным возмущениям относят погрешности, являющиеся результатом влияния погрешности установки заготовок в технологической оснастке, отклонений физико-химических свойств материала и геометрии обрабатываемых деталей в пределах одной партии, изменений величины расхода и химсостава СОТС и т.п.

Отдельные возмущения носят периодический характер (колебание скорости продольной подачи при одном двойном ходе стола, колебание глубины резания, вызванное овальностью обрабатываемой детали и т.д.).

Степень влияния каждого из возмущающих воздействий определяется такими факторами как допуск на разброс механических свойств материала обрабатываемых деталей, допуском на геометрические и, возможными границами колебаний режимов обработки, состояние шлифовального станка, пределы изменения параметров окружающей среды и т. д. Одним из важнейших факторов, определяющих уровень возмущений, является вид и метод шлифования. Например, возмущающие воздействия в виде колебаний скорости износа шлифовального круга имеют высокий уровень для внутришлифовальных станков и, в частности при применении самозатачивающихся кругов на вулканитовой связке (при круглом наружном шлифовании эти возмущения проявляются весьма слабо).

Совершенно по-другому проявляют себя возмущающие воздействия в виде изменения режущей способности шлифовального круга. Эти возмущения практически не оказывают влияние на технологический процесс при обработке изделий самозатачивающимися кругами на внутришлифовальных станках, но в значительной степени проявляются при наружном круглом шлифовании. Как показано в [12, 15 и др.], при круглом наружном шлифовании режущая способность шлифовального круга может изменяться в пределах 1,5...2 раза. Уровень этих возмущений определяется зернистостью, твердостью, структурой шлифовального круга и режимами его правки, принятыми режимами шлифования и рядом других факторов. Хотя механизм и закономерности изменения этого возмущающего воздействия до сего времени

недостаточно изучены, однако известно влияние изменения режущей способности круга на шероховатость поверхности, на геометрию обрабатываемых изделий, глубину прижогов и на некоторые другие качественные показатели обработки [1, 7, 8, 10, 16, 17 и др.].

На технологические процессы, протекающие в условиях самозатачивания шлифовальных кругов, а также при периодических правках круга (не менее одной правки за цикл обработки детали), наиболее существенное влияние оказывают возмущающие воздействия в виде изменения износа круга и упругих деформаций технологической системы. В табл. 1 приведены основные возмущения, действующие на технологическую систему при шлифовальной обработке.

Таблица 1 – Основные возмущающие воздействия на технологическую систему при шлифовальной обработке.

	Возмущающие воздействия	Характер и степень влияния	Методы компенсации
Станок	Колебания (изменение) жесткости узлов станка	Существенный	Увеличение жесткости узлов станка
	Люфт в механизме поперечной подачи	Существенный	Применение безлюфтовых передач
	Температурные деформации	Существенный	Предварительный прогрев, компенсация в комплексе текущих размерных отклонений
Технологическая оснастка	Упругие деформации	Постоянный	Увеличение жесткости
	Температурные деформации	Постоянный	Корректировка по результатам измерений
	Погрешность установки оснастки на станке	Постоянный	Корректировка по результатам измерений
	Погрешность детали установки	Случайный	Компенсация отклонений по результатам измерений
Инструмент	Колебания твердости круга	Случайный	Компенсация отклонений по результатам оценки
	Изменение формы рабочей поверхности круга	Случайный	Компенсация отклонений по результатам оценки
	Колебание режущей способности из-за размерного износа	Постоянный	Стабилизация режимов обработки
	Колебание режущей способности из-за затупления	Слабый	Правка круга
Деталь	Отклонение геометрии заготовки от заданной	Случайный	
	Колебания физико-химических свойств материала	Случайный	
СОТС	Изменение состава и расхода СОТС	Случайный, не существенный за время обработки одной детали	Стабилизация состава СОТС

Рассмотрим характер проявления и степень влияния скорости износа шлифовальных кругов и упругих деформаций технологической системы.

**Скорость износа шлифовальных кругов.** В отличие от других режущих инструментов абразивные шлифовальные круги в процессе работы быстро изнашиваются. Особенно велики линейные и объемные скорости износа шлифовальных кругов при внутреннем шлифовании. Например, при внутреннем шлифовании с полным самозатачиванием

кругов на вулканитовой связке скорости износа кругов соизмеримы со скоростями съема припуска. На рис. 1,а представлена экспериментальная зависимость скорости износа шлифовального круга  $V_w$  от скорости съема припуска  $V_{st}$  (кривая ОАБ), при шлифовании беговых дорожек подшипниковых колец из стали ШХ15 кругами марки 24AF100L7R на вулканитовой связке (построены по данным работ [18-20]).

Зависимость скорости износа круга от скорости съема металла при прочих равных условиях имеет степенной характер:

$$V_w = C_2 V_{st}^m \quad (1)$$

где  $C_2$  и  $m$  – эмпирические коэффициенты, зависящие от свойств и характеристик круга; для рассматриваемого случая они равны:  $C_2 = 0,38$ ;  $m = 2$ .

Степенную кривую (1) можно линеаризовать, представив ее в виде ломаной ОА–АВ, каждый из участков которой является линейной функцией. Тогда

$$V_w = a_2(V_{st} - a_5) \quad (2)$$

где  $a_2$  и  $a_5$  – эмпирические коэффициенты. Для рассматриваемого случая  $a_2 = \frac{AD}{OD} = 0,33$ ;  $a_5 = OB = 0,7$  мм/мин.

Однако скорость износа шлифовального круга зависит не только от режима шлифования (определяемого  $V_{st}$ ), но и в значительной степени изменяется в пределах одной и той же марки. Например, по данным [2, 21, 22 и др.], из-за невыявленных качественных особенностей шлифовальных кругов, не отраженных в его маркировке, скорость износа шлифовальных кругов при прочих равных условиях может изменяться до 1,5...2,3 раза. Особенно велики колебания скорости износа шлифовальных кругов на вулканитовой связке. Например, согласно экспериментальным данным [20], для кругов марок 24AF90/80L7R...24AF100L7R разброс по скорости износа из-за несовершенства технологии их изготовления достигает 2,3...2,5 раза.

На колебания скорости износа шлифовального круга при прочих равных условиях оказывает влияние и размерный износ шлифовального круга. Этот фактор имеет существенное значение для станков, где относительный диаметр шлифовального круга  $D_\delta$  изменяется в сравнительно широком диапазоне от 1,0 до 0,75...0,55 (например, на внутрижелобошлифовальных станках, работающих кругами на вулканитовой связке при шлифовании наружных колец шарикового подшипника).

$$D_\delta = \frac{D_{R0} - 2S_{Ri}}{D_{R0}} = \frac{D_{Ri}}{D_{R0}} \quad (3)$$

где  $D_{R0}$  и  $D_{Ri}$  – начальное и текущее значения диаметра шлифовального круга;  $S_{Ri}$  – текущее значение линейного износа шлифовального круга.

На рис. 1,б графически показаны экспериментальные зависимости изменения скорости износа шлифовального круга в функции скорости съема припуска при шлифовании наружных колец подшипника из стали ШХ15 шлифовальными кругами марки 24AF100L7R с начальным диаметром  $D_{R0} = 90$  мм (по данным работ [18-20]). Анализ графиков на рис. 1,б показывает, что изменения скорости износа самозатачивающихся шлифовальных кругов на вулканитовой связке за счет изменения диаметра круга весьма существенны (изменение  $D_\delta$  в пределах 1,0...0,6) и характеризуются 1,5...2 - кратными отклонениями от некоторого усредненного значения.

На некоторых операциях шлифования размерный износ шлифовального круга сказывается на стабильности качества шлифованных изделий не только в пределах стойкости круга, но и в пределах цикла обработки одного изделия. Для иллюстрации сказанного, в табл. 2 приведены изменения относительного диаметра круга за цикл обработки одного изделия.

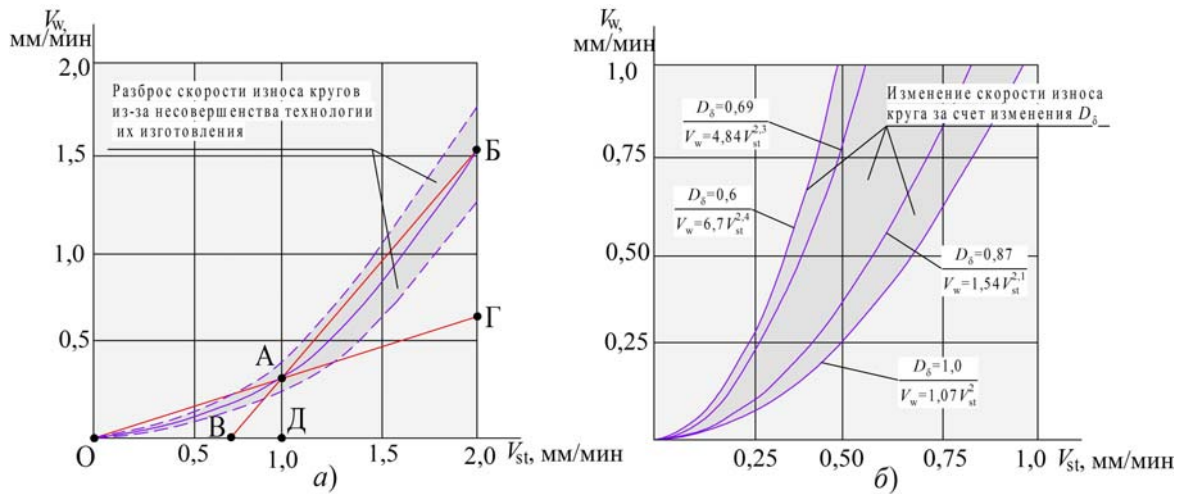


Рисунок 1 – Зависимость скорости износа шлифовального круга от режима обработки: *а* – и разброса качественных характеристик круга; *б* – и относительного диаметра шлифовального круга

Таблица 2 – Изменение относительного диаметра круга

Вид шлифования	Максимальные значения размерного износа кругов за цикл, %.		
	Керамическая связка	Вулканитовая связка	
		Твердость Р	Твердость Н
Внутреннее шлифование отверстий и желобов наружных колец шариковых подшипников	2,0...3,0	2,5...5,0	3,0...7,0
Внутреннее шлифование отверстий и желобов малогабаритных и приборных подшипников	6,0...7,0	8,0...10	10...15
Круглое наружное шлифование	$\leq 0,5$	—	—

Данные табл. 2 показывают, что при шлифовании кругами на вулканитовых и керамических связках при шлифовании канавок в отверстиях на внутришлифовальных станках максимальный размерный износ круга за цикл составляет 2...7% от начального диаметра, а при внутреннем шлифовании малогабаритных изделий (с диаметром 10...15 мм) вследствие малого диаметра круга размерный износ круга за цикл может составить 10...15%.

**Упругие деформации технологической системы**, характер и величина их изменения. Упругие перемещения ТС на шлифовальных станках, приведенные к зоне контакта шлифовального круга с обрабатываемой деталью, имеют величину, соизмеримую с величиной снимаемого припуска. Как показано в [1, 2, 7, 8, 17, 23 и др.], эти перемещения складываются из контактной деформации, обусловленной наличием зазоров между сопрягаемыми деталями оборудования (проявляется как смещение и повороты деталей относительно друг друга) и упругих деформаций ТС (являются функциями жесткости узлов станка, оснастки, обрабатываемой заготовки и характеристик шлифовального круга). При прочих равных условиях суммарные упругие перемещения технологической системы, приведенные к зоне шлифования  $S_j$ , определяются режимами резания, точнее, значениями радиальных усилий  $P_y$ .

Между радиальным усилием и скоростью съема припуска существует (при заданной режущей способности шлифовального круга) линейная зависимость [2, 2, 16 и др.]:

$$V_w = K_{\text{cut}} P_y \quad (4)$$

где  $K_{\text{cut}}$  – размерный коэффициент, характеризующий режущую способность шлифовального круга.

Для процессов шлифования, при которых обработка ведется в условиях с полного или частичного самозатачивания шлифовального круга, или при которых режущая способность шлифовального круга меняется незначительно ( $K_{\text{cut}} = \text{const}$ ), величины упругих деформаций технологической системы однозначно и линейно связаны со скоростью съема припуска. На рисунке 2 показана определенная экспериментально зависимость упругой деформации технологической системы от скорости съема припуска  $S_j = f(V_{\text{st}})$ , при внутреннем шлифовании колец кругами 24AF100L7R (по данным работ [18-20]). В общем виде эта зависимость имеет степенной характер:

$$S_j = C_3 V_{\text{st}}^n \quad (5)$$

где  $C_3$  и  $n$  – эмпирические коэффициенты.

Как показано в [15, 16, 25 и др.], эту степенную зависимость можно с весьма небольшой погрешностью заменить линейной. Тогда

$$S_j = a_3 V_{\text{st}} \quad (6)$$

где  $a_3$  – размерный коэффициент, косвенно характеризующий жесткость технологической системы:

$$a_3 = \frac{1}{K_{\text{cut}} j} \quad (7)$$

где  $j$  – жесткость технологической системы (Н/мм).

Из зависимости (7) следует, что чем больше жесткость технологической системы, тем меньше значение коэффициента  $a_3$ . Для рассматриваемого случая  $a_3 = 3,5$ .

Упругие деформации технологической системы имеют однозначную зависимость от скорости съема припуска лишь для какого-то конкретного состояния станка. Но эта зависимость изменяется в процессе эксплуатации станка и различна у разных станков одной и той же модели. Так, по данным [24], коэффициент  $a_3$  для шлифовальных станков модели может колебаться в пределах от  $a_3 = 3,0$  (новые станки, поступающие в эксплуатацию) до 6,0 и более (те же станки в конце межремонтного периода).

На изменение упругих деформаций технологической системы при прочих равных условиях оказывает влияние и размерный износ шлифовального круга. Для иллюстрации сказанного на рис. 2,б приведены графики изменения  $S_j = f(V_{\text{st}})$  для четырех различных значений относительного диаметра шлифовального круга при шлифовании колец кругами 24AF100L7R (по данным работ [17-19]).

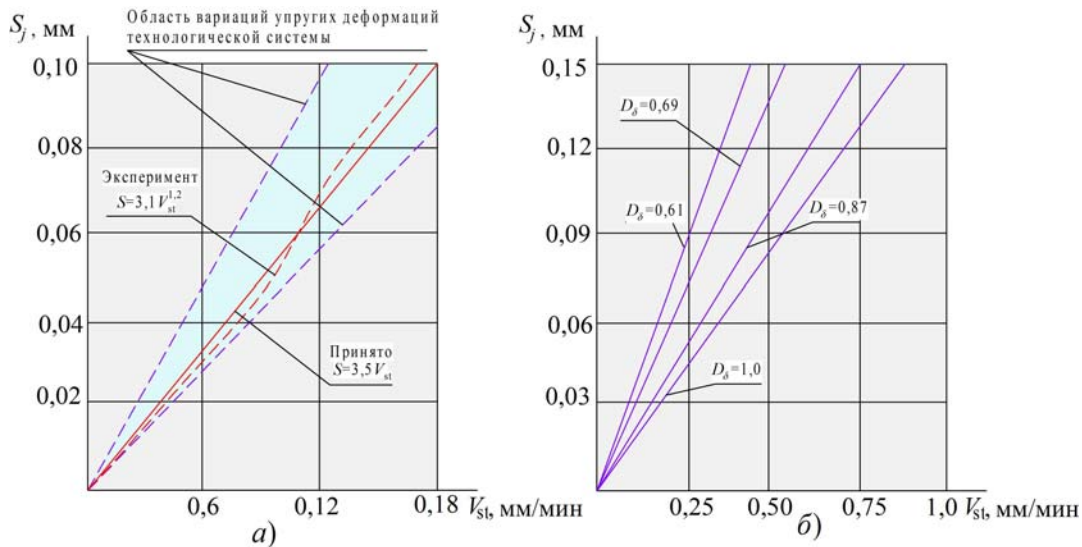


Рисунок 2 – Изменение упругих деформаций технологической системы: *а* – от режима обработки и разброса качественных особенностей круга; *б* – от режима обработки и относительного диаметра шлифовального круга

## Выводы

Анализ изложенного материала показывает, что в большинстве случаев в пределах цикла обработки одного изделия размерный износ круга можно игнорировать, а учитывать лишь изменения скорости износа круга за период стойкости в пределах  $D_{\delta min} \leq D_\delta \leq 1$ . В пределах периода стойкости шлифовального круга изменение упругих деформаций технологической системы за счет уменьшения диаметра круга существенны и характеризуются 25...30% отклонениями от некоторых усредненных значений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке. Севастополь: Изд-во СевНТУ. 2012. 304 с.
2. Stępień P. A probabilistic model of the grinding process // Applied Mathematical Modelling. 2009. Vol. 33. Iss. 10. P. 3863–3884.
3. Stephen Malkin, Changsheng Guo. Grinding technology. Theory and Applications of Machining with Abrasives. New York: Industrial Press Publ.. 2008. 369 p.
4. Богущкий В.Б., Братан С.М., Новосёлов Ю.К. Системный анализ операции чистового шлифования // Вестник СевНТУ. 2013. Вып. 139/2013. С.13-21
5. C.N. de Souza, Catai R.E., P.R. de Aguiar, Salgado M.H. Analysis of diametrical wear of grinding wheel and roundness errors in the machining of steel VC 131 // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2004. Vol. XXVI. No. 2. P. 209-212.
6. Ардашев Д.В. Оценка работоспособности шлифовального круга по комплексу эксплуатационных показателей. Дис... канд. техн. наук. Челябинск. 2005. 261 с.
7. Bogutsky V., Shron L., Yagyayev E.E. Evaluation of the effect of changing the geometry of the abrasive grains of the grinding wheel on the characteristics of the roughness of the grinded surface // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol.709. Iss. 3. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/709/4/044117>.
8. Сизый Ю.А. Статическая и динамическая характеристики технологической системы круглого врезного шлифования // Резание и инструмент в технологических системах. Харьков: ХГПУ. 2003. Вып. 64. С.185-192.

9. Гузеев В.И., Нуркенов А.Х. Проектирование циклов врезного шлифования на основе динамической жесткости технологической системы // Будущее машиностроения России 2014: сб. тез. Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. С. 29-30.
10. Евсеев Д.Г. Формирование свойств поверхностных слоев при абразивной обработке. Саратов: Изд-во Саратовск. ун-та. 1975. 127 с.
11. Firsov I.V., Tchigirinskiy Ju.L., Chigirinskaya N.V. Features of formation of surface layer properties in multistage processing of Cr-Ni steel// Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). Springer. P. 1149-1157. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-22063-1\\_122](https://doi.org/10.1007/978-3-030-22063-1_122).
12. Klocke F. Manufacturing Processes 2: Grinding, Honing, Lapping. Springer-Verlag Publ. 2009. 433 p.
13. Теория технических систем / Ю.Н. Кузнецов, Ю.К. Новоселов, И.В. Луцив. Севастополь: Изд-во СевНТУ. 2010. 252 с.
14. Никифоров И.П. Стохастическая модель процесса шлифования // Известия вузов. Машиностроение. 2003. № 6. С. 64-72.
15. Лурье Г.Б. Оптимизация цикла шлифования на основе адаптивного управления // Машиностроитель. 1979. №3. С.12-14.
16. Marinescu I.D., Rowe W.B., Dimitrov B., Inasaki I. Tribology of abrasive machining processes. Cover Art Publ.. 2004. 764 p.
17. Богущкий В.Б., Новоселов Ю.К. Оценка степени влияния отдельных режимов резания на показатели процесса шлифования // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2019. Т. 5. № 3. С. 69-76. URL: <http://vestnik-nauki.ru/wp-content/uploads/2019/10/2019-N3-NovoselovBogutsky.pdf>
18. Муцянко В.И., Неижкаша А.Г., Давыдов И.Т. Влияние размеров круга на его эксплуатационные свойства // Абразивы. 1978. № 5. С. 2-3.
19. Хшиво Л.Н. Оценка эксплуатационных свойств шлифовальных кругов на вулканитовой связке по деформациям вдавливания острого конуса //Абразивы. 1975. № 8. С. 11-14.
20. Железнов Е.С. Новый электрический следящий привод подачи сферошлифовальных станков. Дис... канд. техн. наук. – Куйбышев, 1958. 138 с.
21. Oliveira J.F.G., Silva E.J., Guo C., Hashimoto F. Industrial challenges in grinding // CIRP Annals - Manufacturing Technology. 2009. Vol. 58. Iss. 2. P. 663–680.
22. Wegener K., Hoffmeister H.-W., Karpuschewski B. et al. Conditioning and monitoring of grinding wheels // CIRP Annals. Manufacturing Technology. 2011. Vol. 60. P. 757–777.
23. Гунин В.И. Исследование точности шлифовальных станков и стабильности формы их базовых деталей. Дис... канд. техн. наук. Воронеж. 1973. 205 с.
24. Никифоров И.П. Повышение эффективности внутреннего шлифования в условиях пониженной жесткости технологической системы. Дис... д-ра техн. наук. Санкт-Петербург. 2007. 311 с.
25. Ипполитов Г.М. Абразивно-алмазная обработка. М: Машиностроение. 1969. 334 с.

## REFERENCES

1. Novoselov Yu.K. Dinamika formoobrazovaniya poverhnostej pri abrazivnoj obrabotke [The Dynamics of Formation of Surfaces in Abrasive Machining]. Sevastopol': Iz-vo SevNTU. 2012. 304 p.
2. Stepień P. A probabilistic model of the grinding process. Applied Mathematical Modelling. 2009. Vol. 33. Iss. 10. P. 3863–3884.
3. Stephen Malkin, Changsheng Guo. Grinding technology. Theory and Applications of Machining with Abrasives. New York: Industrial Press Publ.. 2008. 369 p.



4. Boguckij V.B., Bratan S.M., Novosyolov YU.K. Sistemnyj analiz operacii chistovogo shlifovaniya [System analysis of the finishing grinding operation]. Vestnik SevNTU. 2013. Vol. 139/2013. P. 13-21.
5. C.N. de Souza, Catai R.E., P.R. de Aguiar, Salgado M.H. Analysis of diametrical wear of grinding wheel and roundness errors in the machining of steel VC 131. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2004. Vol. XXVI. No. 2. P. 209-212.
6. Ardashev D.V. Ocenka rabotosposobnosti shlifoval'nogo kruga po kompleksu eksploatacionnyh pokazatelej [Evaluation of the efficiency of the grinding wheel by a set of exploitative indicators]. Dis... kand. tekhn. nauk. CHelyabinsk. 2005. 261 p.
7. Bogutsky V., Shron L., Yagyayev E.E. Evaluation of the effect of changing the geometry of the abrasive grains of the grinding wheel on the characteristics of the roughness of the grinded surface. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 709. Iss. 3. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/709/4/044117>.
8. Sizyj YU.A. Sticheseskaya i dinamicheskaya harakteristiki tekhnologicheskoy sistemy kruglogo vreznogo shlifovaniya [Static and dynamic characteristics of the technological system of round mortise grinding]. Rezanie i instrument v tekhnologicheskikh sistemah. Har'kov: HGPU. 2003. Vol. 64. P.185-192.
9. Guzeev V.I., Nurkenov A.H. Proektirovanie ciklov vreznogo shlifovaniya na osnove dinamicheskoy zhestkosti tekhnologicheskoy sistemy [Design of mortise grinding cycles based on the dynamic stiffness of the technological system]. Budushchee mashinostroeniya Rossii 2014: sb. tez. Moscow: MGTU im. N.E. Baumana. 2014. P. 29-30.
10. Evseev D.G. Formirovanie svoystv poverhnostnyh sloev pri abrazivnoj obrabotke [Formation of properties of surface layers during abrasive processing]. Saratov: Izd-vo Saratovsk. un-ta. 1975. 127 p.
11. Firsov I.V., Tchigirinskiy Ju.L., Chigirinskaya N.V. Features of formation of surface layer properties in multistage processing of Cr-Ni steel. Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). Springer. P. 1149-1157. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-22063-1\\_122](https://doi.org/10.1007/978-3-030-22063-1_122).
12. Klocke F. Manufacturing Processes 2: Grinding, Honing, Lapping. Springer-Verlag Publ. 2009. 433 p.
13. Teoriya tekhnicheskikh sistem [Theory of technical systems]. Yu. N. Kuznecov, Yu.K. Novoselov, I.V. Luciv. Sevastopol': Izd-vo SevNTU. 2010. 252 c.
14. Nikiforov I.P. Stohasticheskaya model' processa shlifovaniya [Stochastic model of the grinding process]. Izvestiya vuzov. Mashinostroenie. 2003. № 6. P. 64-72.
15. Lur'e G.B. Optimizaciya cikla shlifovaniya na osnove adaptivnogo upravleniya [Optimization of the grinding cycle based on adaptive control]. Mashinostroitel'. 1979. №3. P.12-14.
16. Marinescu I.D., Rowe W.B., Dimitrov B., Inasaki I. Tribology of abrasive machining processes. Cover Art Publ.. 2004. 764 p.
17. Bogutsky V.B., Novoselov Yu.K. Ocenka stepeni vliyaniya otdel'nyh rezhimov rezaniya na pokazateli processa shlifovaniya [Evaluation of the degree of the influence of individual cutting modes on the parameters of the grinding process]. Journal of Science and Education of North-West Russia. 2019. T. 5. № 3. C. 69-76. URL: <http://vestnik-nauki.ru/wp-content/uploads/2019/10/2019-N3-NovoselovBogutsky.pdf>.
18. Mucyanko V.I., Neizhkasha A.G., Davydov I.T. Vliyanie razmerov kruga na ego eksploatacionnye svoystva [Influence of the size of the wheel on its operational properties]. Abrazivy. 1978. № 5. P. 2-3.
19. Hshivo L.N. Ocenka eksploatacionnyh svoystv shlifoval'nyh krugov na vulkanitovoj svyazke po deformaciyam vdavlivaniya ostrogo konusa [Evaluation of the performance properties of grinding wheels on a vulcanite bond by indentation deformations of a sharp cone]. Abrazivy. 1975. № 8. P. 11-14.

20. ZHeleznov E.S., Mihel'kevich V.N. Avtomaticheskoe upravlenie poperechnoj podachej na vnutrishlifoval'nom stanke [Automatic control of the cross feed on the internal grinding machine]. Stanki i instrument. 1960. № 6. P 18-20.
21. Oliveira J.F.G., Silva E.J., Guo C., Hashimoto F. Industrial challenges in grinding// CIRP Annals - Manufacturing Technology. 2009. Vol. 58. Iss. 2. P. 663-680.
22. Wegener K., Hoffmeister H.-W., Karpuschewski B. et al. Conditioning and monitoring of grinding wheels. CIRP Annals. Manufacturing Technology. 2011. Vol. 60. P. 757-777.
23. Gunin V.I. Issledovanie tochnosti shlifoval'nyh stankov i stabil'nosti formy ih bazovyh detalej [Research of the accuracy of grinding machines and the shape stability of their basic parts]. Dis... kand. tekhn. nauk. Voronezh. 1973. 205 p.
24. Nikiforov I.P. Povyshenie effektivnosti vnutrennego shlifovaniya v usloviyah ponizhennoj zhestkosti tekhnologicheskoy sistemy [Improving the efficiency of internal grinding in conditions of reduced rigidity of the technological system]. Dis... d-ra tekhn. nauk. Sankt-Peterburg. 2007. 311 p.
25. Ippolitov G.M. Abrazivno–almaznaya obrabotka [Abrasive and diamond processing]. M: Mashinostroenie. 1969. 334 p.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

*Богуцкий Владимир Борисович*

Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, Россия, кандидат технических наук, доцент кафедры Технология машиностроения.

E-mail: [bogutskivb@yandex.ru](mailto:bogutskivb@yandex.ru)

*Bogutsky Vladimir Borisovich*

Sevastopol State University, Sevastopol, Russia, candidate of technical sciences, assistant professor of dept. Technology of mechanical engineering.

E-mail: [bogutskivb@yandex.ru](mailto:bogutskivb@yandex.ru)

Корреспондентский почтовый адрес и телефон для контактов с автором статьи:

229053, г. Севастополь, ул. Университетская 33. Богуцкий В.Б.

+7 (8692) 54-06-67