

СЕРГЕЕВ А. С., ДИТИНЕНКО С. А., НОВИКОВ Ф. В.

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ОБРАБОТКИ ПРИ ШЛИФОВАНИИ ПУТЕМ УМЕНЬШЕНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ

Приведены аналитические зависимости для определения условий уменьшения шероховатости поверхности при шлифовании, полученные с позиции теоретико-вероятностного подхода. Показано, что учет вероятностного характера участия зерен круга в резании позволяет более достоверно оценить закономерности формирования шероховатости поверхности при шлифовании. Показано также, что параметр шероховатости Ra , рассчитанный на основе теоретико-вероятностного подхода, в 3 раза больше аналогичного значения, рассчитанного без учета вероятностного характера участия зерен шлифовального круга в резании. Поэтому применение абразивных инструментов с упорядоченным расположением режущих зерен на его рабочей поверхности позволяет повысить качество обработки за счет уменьшения параметра шероховатости поверхности Ra . Теоретически и экспериментально установлено, что обеспечение примерно одновысотного расположения режущих зерен на рабочей поверхности шлифовального круга позволяет существенно уменьшить шероховатость поверхности – до уровня, достигаемого при доводке алмазной пастой и абразивном полировании. На этой основе разработана эффективная технология внутреннего шлифования отверстий в пневмо- и гидроцилиндрах с использованием мягкого войлочного круга с наклеенным слоем абразивного порошка 63С 20П, обеспечивающего шероховатость поверхности $Ra=0,04$ мкм.

Ключевые слова: качество обработки, внутреннее шлифование, теория вероятностей, одновысотное расположение режущих зерен, производительность обработки, доводка, абразивное полирование

СЕРГЄЄВ О. С., ДИТИНЕНКО С. О., НОВИКОВ Ф. В.

ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ОБРОБКИ ПРИ ШЛІФУВАННІ ШЛЯХОМ ЗМЕНШЕННЯ ШОРСТКОСТІ ПОВЕРХНІ

Наведено аналітичні залежності для визначення умов зменшення шорсткості поверхні при шліфуванні, отримані з позиції теоретико-імовірнісного підходу. Показано, що урахування імовірнісного характеру участі зерен круга в різанні дозволяє більш достовірно оцінити закономірності формування шорсткості поверхні при шліфуванні. Показано також, що параметр шорсткості Ra , розрахований на основі теоретико-імовірнісного підходу, в 3 рази більше аналогічного значення, розрахованого без урахування імовірнісного характеру участі зерен шліфувального круга в різанні. Тому застосування абразивних інструментів з упорядкованим розташуванням ріжучих зерен на його робочій поверхні дозволяє підвищити якість обробки за рахунок зменшення параметра шорсткості поверхні Ra . Теоретично й експериментально встановлено, що забезпечення приблизно одновисотного розташування ріжучих зерен на робочій поверхні шліфувального круга дозволяє суттєво зменшити шорсткість поверхні – до рівня, що досягається при доведенні алмазною пастою та абразивному поліруванні. На цій основі розроблено ефективну технологію внутрішнього шліфування отворів в пневмо- та гідроциліндрах з використанням м'якого повстяного круга з наклеєним шаром абразивного порошку 63С 20П, що забезпечує шорсткість поверхні $Ra = 0,04$ мкм.

Ключові слова: якість обробки, внутрішнє шліфування, теорія ймовірностей, одновисотне розташування ріжучих зерен, продуктивність обробки, доведення, абразивне полірування

SERHIEIEV OLEKSANDR, DITINENKO STANISLAV, NOVIKOV FEDIR

IMPROVEMENT OF QUALITY OF PROCESSING WHEN GRINDING BY REDUCING SURFACE ROUGHNESS

Analytical dependences are given for determining the conditions for reducing the surface roughness during grinding, obtained from the standpoint of the probability-theoretical approach. It is shown that taking into account the probabilistic nature of the participation of grains of the grinding wheel in cutting allows a more reliable assessment of the patterns of formation of surface roughness during grinding. It was also shown that the roughness parameter Ra , calculated on the basis of the probability-theoretical approach, is 3 times larger than the similar value calculated without taking into account the probabilistic nature of the participation of grinding wheel grains in cutting. Therefore, the use of abrasive tools with an ordered arrangement of cutting grains on its working surface allows improving the quality of processing by reducing the surface roughness parameter Ra , which is confirmed by numerous practical data. It has been theoretically and experimentally established that providing approximately the same height arrangement of cutting grains on the working surface of the grinding wheel allows reduce surface roughness - to the level achieved when finishing the diamond pass Toy and abrasive polishing. In this case, it becomes possible to carry out preliminary and final processing in one grinding operation, reducing the complexity and increasing the processing productivity. On this basis, an effective operation has been developed for internal grinding of holes in pneumatic and hydraulic cylinders using a soft felt circle with a glued layer of abrasive powder 63C 20P, providing a surface roughness of $Ra = 0.04$ μm .

Keywords: processing quality, internal grinding, probability theory, single-height arrangement of cutting grains, processing performance, fine-tuning, abrasive polishing

Введение. Повышение качества обработки деталей машин путем уменьшения шероховатости поверхности является одним из важнейших условий создания конкурентоспособной машиностроительной продукции. В связи с этим, вопросам совершенствования абразивной обработки и особенно процессов шлифования, характеризующихся высокой производительностью, постоянно уделяется большое внимание. Это относится к созданию новых

характеристик абразивных и алмазных кругов, определению оптимальных условий обработки с учетом ограничений по шероховатости поверхности и т.д. Вместе с тем, закономерности формирования шероховатости поверхности при шлифовании чрезвычайно сложны и требуют дальнейших глубоких теоретических исследований с применением теории вероятностей. В особой мере это относится к операциям внутреннего шлифования отверстий в

пневмо- и гидроцилиндрах, где применяются круги небольшого диаметра, не позволяющие добиться высоких показателей шероховатости поверхности. Поэтому в работе решается актуальная для машиностроения задача аналитического определения шероховатости поверхности при шлифовании, выявления и обоснования условий ее уменьшения.

Анализ последних исследований и публикаций. Длительное время при анализе закономерностей формирования шероховатости поверхности при шлифовании подходили с кинематико-геометрических позиций без учета вероятностного участия зерен шлифовального круга в резании [1]. Это ограничивало возможности объективного представления о путях снижения шероховатости поверхности. Поэтому на смену упрощенному кинематико-геометрическому подходу пришел теоретико-вероятностный подход [2–4], позволивший принципиально по-новому решать задачи по определению оптимальных условий шлифования с учетом требований по шероховатости поверхности. Он положен в основу создания новых более эффективных технологий абразивной обработки и особенно процессов шлифования, обеспечивающих, наряду с повышением производительности, более высокие показатели шероховатости поверхности. В результате в ряде случаев удалось предварительное и окончательное шлифование объединить в одну операцию, что позволило снизить трудоемкость и повысить производительность обработки без ухудшения шероховатости поверхности. В связи с

этим, важно, используя теоретико-вероятностный подход, обосновать условия уменьшения шероховатости поверхности при шлифовании, в особенности при внутреннем шлифовании отверстий в пневмо- и гидроцилиндрах.

Цель работы – теоретический анализ условий уменьшения шероховатости поверхности на основе вероятностного представления закономерностей участия зерен шлифовального круга в резании.

Изложение основного материала. Для решения поставленной задачи следует воспользоваться результатами исследований, приведенных в работе [5]. В ней проведен теоретический анализ параметров шероховатости поверхности R_a и R_{max} при неупорядоченном расположении режущих зерен на рабочей поверхности абразивного инструмента и их вероятностном участии в резании (рис 1,а). В основу расчетов положена вероятностная функция $\Phi(y)$, определяющая вероятность неснятого материала (в виде микронеровностей) с поверхности образца:

$$\Phi(y) = e^{-\frac{2 \cdot \text{tg} \gamma \cdot n}{B} \cdot y}, \quad (1)$$

где γ – половина угла при вершине конусообразного режущего зерна; n – количество абразивных зерен, принимающих участие в процессе образования шероховатости поверхности; B – ширина образца, м; y – координата, отсчитываемая от вершины режущего зерна, м.

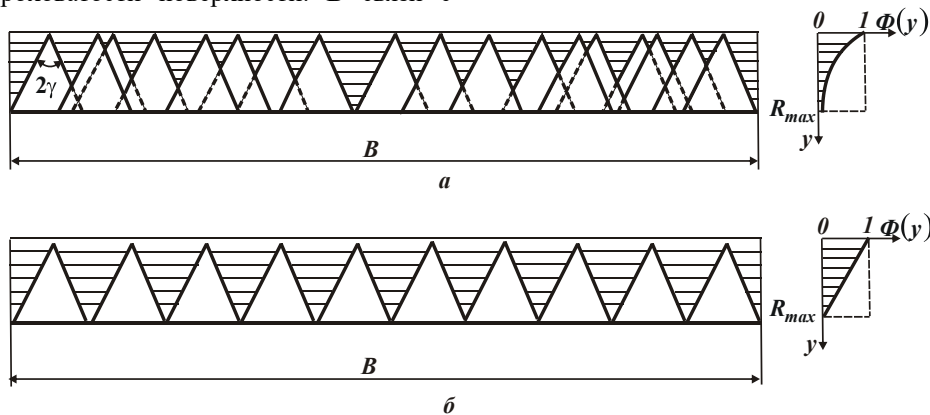


Рис. 1. Расчетная схема вероятностной функции $\Phi(y)$ при неравномерном (а) и равномерном (б) расположении проекций зерен

Положение средней линии $y = a$, которая разделяет микропрофиль обработанной поверхности на две части, определяется из условия равенства заштрихованных на рис. 2 площадей F_1 и F_2 :

$$a = \int_0^{R_{max}} \Phi(y) \cdot dy = \frac{B}{2 \cdot \text{tg} \gamma \cdot n} \cdot \left(1 - e^{-\frac{2 \cdot \text{tg} \gamma \cdot n \cdot R_{max}}{B}} \right). \quad (2)$$

На рис. 2 наибольшая впадина микропрофиля соответствует значению $y = 0$, а наибольший выступ микропрофиля – значению $y = R_{max}$ (рис. 1). Тогда параметр шероховатости поверхности R_a описывается зависимостью (рис. 2) [5]:

$$R_a = 2 \cdot \int_a^{R_{max}} \Phi(y) \cdot dy = \frac{B}{\text{tg} \gamma \cdot n} \cdot \left(e^{-\frac{2 \cdot \text{tg} \gamma \cdot n \cdot a}{B}} - e^{-\frac{2 \cdot \text{tg} \gamma \cdot n \cdot R_{max}}{B}} \right). \quad (3)$$

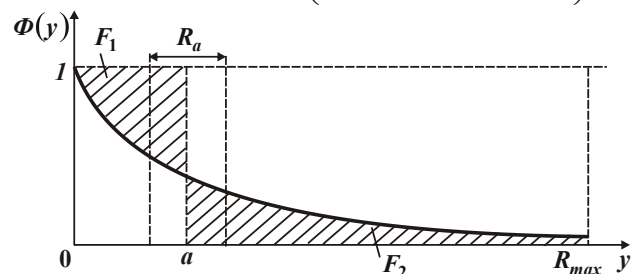


Рис. 2. Расчетная схема параметра шероховатости поверхности R_a

В действительности, пределом интегрирования экспоненциальной функции $\Phi(y)$ в зависимостях (2) и (3) следует рассматривать $y \rightarrow \infty$ вместо $y = R_{max}$. Тогда зависимости (2) и (3) примут вид:

$$a = \frac{B}{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n}; \quad (4)$$

$$R_a = \frac{0,367 \cdot B}{\operatorname{tg} \gamma \cdot n}. \quad (5)$$

Как видно, параметры a и R_a определяются величиной n : чем она больше, тем меньше a и R_a .

При упорядоченном расположении режущих зерен на рабочей поверхности абразивного инструмента и, соответственно, при упорядоченном наложении проекций зерен на диаметрально плоскость обрабатываемого образца (рис. 1,б) функция $\Phi(y)$ принимает вид:

$$\Phi(y) = 1 - \frac{y}{R_{max}}. \quad (6)$$

Подставляя зависимость (6) в (2) и (3), имеем:

$$a = \int_0^{R_{max}} \left(1 - \frac{y}{R_{max}}\right) \cdot dy = \frac{R_{max}}{2}; \quad (7)$$

$$R_a = 2 \cdot \int_a^{R_{max}} \left(1 - \frac{y}{R_{max}}\right) \cdot dy = \frac{R_{max}}{4}. \quad (8)$$

Параметр шероховатости поверхности R_{max} в данном случае определяется из условия: $2 \operatorname{tg} \gamma \cdot n \cdot R_{max} = B$. Откуда

$$R_{max} = \frac{B}{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n}. \quad (9)$$

Соответственно

$$a = \frac{B}{4 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n}; \quad (10)$$

$$R_a = \frac{0,125 \cdot B}{\operatorname{tg} \gamma \cdot n}. \quad (11)$$

Сравнивая зависимости (5) и (11), видно, что при упорядоченном расположении режущих зерен на рабочей поверхности абразивного инструмента и, соответственно, при упорядоченном наложении проекций зерен на диаметрально плоскость обрабатываемого образца (рис. 1, а), параметр шероховатости поверхности R_a в 3 раза меньше, чем при неупорядоченном наложении проекций зерен на диаметрально плоскость обрабатываемого образца (рис. 1, б). Это указывает на то, что неупорядоченный (вероятностный) характер участия зерен в резании приводит к увеличению параметра шероховатости поверхности R_a (рис. 3) и, соответственно, к ухудшению качества обрабатываемой поверхности. Поэтому применение абразивных инструментов с упорядоченным расположением режущих зерен на его рабочей поверхности (например, абразивных лент, т.е. при ленточном шлифовании) позволяет повысить качество обработки за счет уменьшения параметра шероховатости поверхности R_a , что подтверждается многочисленными практическими данными [6].

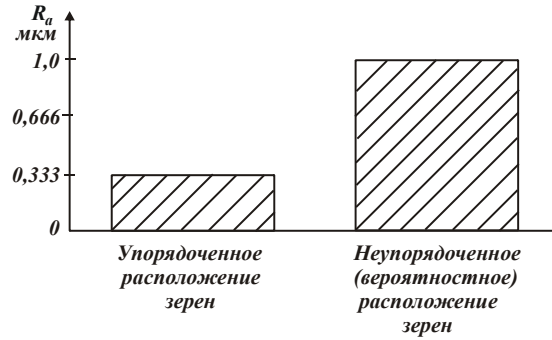


Рис. 3. Расчетные значения параметра R_a при упорядоченном и неупорядоченном расположении зерен на рабочей поверхности абразивного инструмента:

$$B = 1 \text{ мм}; \quad \gamma = 45^0; \quad n = 3,67 \cdot 10^3 \text{ шт.}$$

В отличие от параметра шероховатости поверхности R_a , параметр шероховатости поверхности R_{max} для экспоненциальной функции $\Phi(y)$, описываемой зависимостью (1), можно определить лишь с наперед заданной степенью точности. Например, при условии $y = R_{max}$, принимая значение $\Phi(y = R_{max}) = 0,1; 0,01; 0,001$ и т.д. Тогда при условии $y = R_{max}$ зависимость (1) опишется:

$$R_{max} = -\frac{\ln \Phi(y = R_{max}) \cdot B}{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n}. \quad (12)$$

Знак «минус» в зависимости (12) показывает, что функция $\ln \Phi(y = R_{max})$ является отрицательной.

С учетом зависимостей (12) и (5) отношение $R_{max} / R_a = -1,362 \cdot \ln \Phi(y = R_{max})$.

Принимая $\Phi(y = R_{max}) = 0,1$, имеем $\ln \Phi(y = R_{max}) = -2,3$. Тогда:

$$R_{max} = \frac{1,15 \cdot B}{\operatorname{tg} \gamma \cdot n}; \quad \frac{R_{max}}{R_a} = 3,133.$$

Принимая $\Phi(y = R_{max}) = 0,01$, имеем $\ln \Phi(y = R_{max}) = -4,6$. Соответственно:

$$R_{max} = \frac{2,3 \cdot B}{\operatorname{tg} \gamma \cdot n}; \quad \frac{R_{max}}{R_a} = 6,266.$$

С уменьшением значения $\Phi(y = R_{max})$ параметр R_{max} и отношение R_{max} / R_a увеличиваются, причем, в неограниченных пределах. Поэтому установить истинные значения параметра R_{max} и R_{max} / R_a можно, используя иные условия. Например, рассматривая упорядоченное расположение зерен на рабочей поверхности инструмента (рис. 1,б). В этом случае, согласно зависимости (8), параметр $R_{max} = 4R_a$. Однако в реальных условиях абразивной обработки, как правило, имеет место неупорядоченное расположение режущих зерен на рабочей поверхности абразивного инструмента (рис. 1, а). Поэтому закономерности формирования шероховатости поверхности следует рассматривать с позиции теории вероятностей. С учетом зависимости (5) вероятностную функцию $\Phi(y)$, описываемую зависимостью (1), можно представить в виде:

$$\Phi(y) = e^{-\frac{0,734}{R_a} \cdot y} \quad (13)$$

Очевидно, чем больше параметр шероховатости поверхности R_a , тем меньше значение функции $\Phi(y)$. Поэтому при абразивном полировании, характеризующемся меньшими значениями R_a по сравнению с шлифованием, функция $\Phi(y)$ будет принимать меньшие значения (рис. 4,а), а функция $\varepsilon(y) = 1 - \Phi(y)$, наоборот, большие значения (рис. 4,б). Подтверждением тому являются экспериментальные графики изменения классической функции – относительной опорной длины микропрофиля обработанной поверхности t_p (в %) после различных методов обработки (рис. 5 [5]). Они указывают на то, что при абразивном полировании достигается наименьшее значение шероховатости обработанной поверхности.

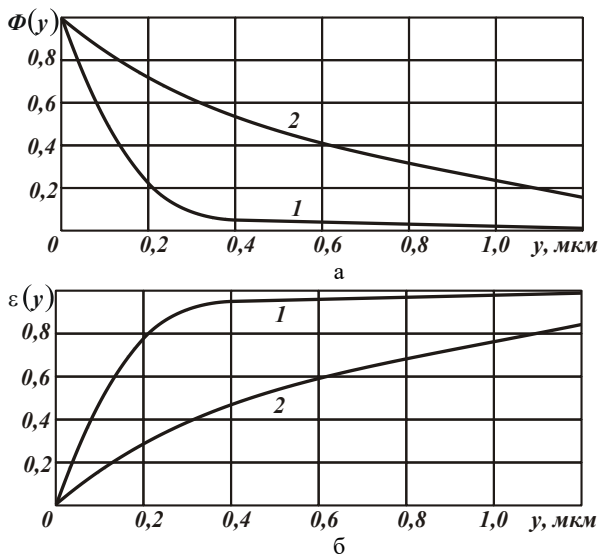


Рис. 4. Графики изменения функций $\Phi(y)$ и $\varepsilon(y)$:
1 – $R_a = 0,1$ мкм; 2 – $R_a = 0,5$ мкм

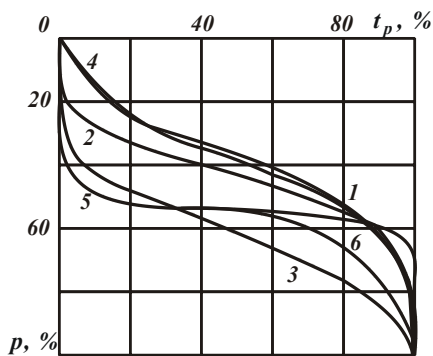


Рис. 5. Относительные опорные длины микропрофиля обработанной поверхности t_p (в %) образцов из сплава АМг4 после различных методов обработки: 1 – прокат (виходная поверхность); 2 – гидроабразивная обработка; 3 – точение; 4 – фрезерование; 5 – абразивное полирование; 6 – точение алмазом

Приведенные на рис. 5 графики функции t_p (в %) соответствуют графику изменения функции $\varepsilon(y) = 1 - \Phi(y)$, рис. 4. Для этого следует рассматривать координату y направленной в противоположную сторону, т.е. вниз с вершины наибольшей микронеровности. По мере увеличения координаты y функция $\varepsilon(y) = 1 - \Phi(y)$ непрерывно увеличивается, асимптотически приближаясь к значению 1. Исходя из рис. 5, при абразивном полировании функция t_p увеличивается незначительно, а затем фактически при одинаковом значении y увеличивается почти от 0 до 1 и далее лишь асимптотически неограниченно приближается к значению 1. По сути, значение координаты y , при котором происходит резкое увеличение функции t_p , определяет положение средней линии микропрофиля обработанной поверхности $y = a$ (рис. 2). Такое резкое увеличение функции t_p фактически от 0 до 1 указывает на весьма малое значение параметра шероховатости поверхности R_a , равное 0,1 мкм.

Наблюдаемое небольшое увеличение функции t_p на участке, предшествующем ее резкому увеличению фактически от 0 до 1, связано с наличием небольшого количества зерен, имеющих большую высоту выступания по сравнению с основной массой зерен. Следовательно, резкое изменение функции t_p в диапазоне от 0 до 1 объясняется участием в резании большого количества абразивных зерен, имеющих приблизительно одинаковую высоту выступания над уровнем рабочей поверхности абразивного инструмента. Поэтому эффект абразивного полирования состоит в первую очередь в возможности обеспечения фактически одновысотного расположения абразивных зерен на рабочей поверхности абразивного инструмента.

На рабочей поверхности шлифовального круга режущие зерна расположены разновысотно. В результате происходит разновысотное участие зерен в резании. Это приводит к увеличению параметров шероховатости поверхности R_a , R_{max} и ухудшению качества обработки.

Таким образом показано, что при абразивном полировании можно добиться существенного уменьшения шероховатости обрабатываемой поверхности. Однако при этом продолжительность обработки достаточно высокая. Так, установлено, что продолжительность операции круглого наружного шлифования твердосплавного режущего инструмента (развертки) составляет 1 ... 5 мин при съеме припуска до 2 мм. Продолжительность операции доводки алмазной пастой этого инструмента при съеме припуска 0,02 мм составляет от 3 до 12 мин и более. Как видно, процесс шлифования более производителен, однако требует изыскания путей уменьшения шероховатости поверхности до уровня, достигаемого при доводке и абразивном полировании.

Одним из эффективных направлений решения такой задачи применительно к внутреннему шлифованию может быть использование мягкого войлочного (фетрового) круга с наклеенным слоем абразивного порошка 63С 20П [7]. Экспериментально установлено, что в этом случае за 30 минут шлифования достигается шероховатость поверхности $R_a=0,04$ мкм. Это открывает новые возможности существенного уменьшения параметра шероховатости поверхности R_a без увеличения трудоемкости и уменьшения производительности обработки. Также эффективно внутреннее шлифование производить, устанавливая ось вращения шлифовального круга с индивидуальным приводом перпендикулярно оси вращения обрабатываемого отверстия. Это позволяет увеличить площадь контакта круга с обрабатываемой поверхностью и изменить направление образования рисок от проработавших зерен. Они образуются вдоль обрабатываемой поверхности, что повышает работоспособность пневмо- и гидроцилиндров.

Выводы. Приведены аналитические зависимости для определения условий уменьшения шероховатости поверхности при шлифовании, полученные с позиции теоретико-вероятностного подхода. Показано, что учет вероятностного характера участия зерен шлифовального круга в резании позволяет более достоверно оценить закономерности формирования шероховатости поверхности при шлифовании. Теоретически и экспериментально установлено, что обеспечение примерно одновысотного расположения режущих зерен на рабочей поверхности шлифовального круга позволяет существенно уменьшить шероховатость поверхности – до уровня, достигаемого при доводке алмазной пастой и абразивном полировании. На этой основе разработана эффективная операция внутреннего шлифования отверстий в пневмо- и гидроцилиндрах с использованием мягкого войлочного круга с наклеенным слоем абразивного порошка 63С 20П, обеспечивающего шероховатость поверхности $R_a=0,04$ мкм.

Список литературы:

1. Маслов Е.Н. Теория шлифования металлов / Е.Н. Маслов. – М.: Машиностроение, 1974. – 319 с.

2. Шероховатость поверхностей (теоретико-вероятностный подход) / А.П. Хусу, Ю.Р. Витенберг, В.А. Пальмов. – М.: Гл. ред. физ.-мат. литературы изд-ва "Наука", 1975. – 344 с.
3. Королев А. В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке / А. В. Королев. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. – 212 с.
4. Новоселов Ю. К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю. К. Новоселов. – Саратов, 1979. – 232 с.
5. Новиков Ф. В. Основы обработки металлов с оптическими свойствами : монография / Ф.В. Новиков, В.Г. Шкурूपий. – Харьков: ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2015. – 388 с.
6. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования / А.В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с.
7. Новиков Ф. В. Условия уменьшения шероховатости поверхности при финишной абразивной обработке отверстий в цилиндрах / Ф. В. Новиков, А. А. Андилахай, А. С. Сергеев // Качество, стандартизация, контроль: теория и практика: Материалы 19-й Международной научно-практической конференции, 09–13 сентября 2019 г., г. Одесса.– Киев: АТМ України, 2019. – С. 96–98.

References (transliterated)

1. Maslov Ye. N. Teoriya shlifovaniya metallov [Theory of grinding metals]. Moskva, Mashinostroyeniye, 1974. 319 s.
2. Khusu A. P., Vitenberg YU. R., Pal'mov V. A. Sherokhovatost' poverkhnostey (teoretiko-veroyatnostny podkhod) [Roughness of surfaces (probability-theoretical approach)]. Moskva, Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury izdatel'stva "Nauka", 1975. 344 s.
3. Korolev A. V. Issledovaniye protsessov obrazovaniya poverkhnostey instrumenta i detali pri abrazivnoy obrabotke [Investigation of the processes of formation of tool surfaces and parts during abrasive processing]. Saratov, Izdatel'stvo Sarat. Un-ta, 1975. 212 s.
4. Novoselov YU. K. Dinamika formoobrazovaniya poverkhnostey pri abrazivnoy obrabotke [Dynamics of surface formation during abrasive processing]. Saratov, 1979. 232 s.
5. Novikov F. V., V. H. Shkurupiy. Osnovy obrobki metalevykh vyrobiv z optychnymy vlastyvostyamy : monografiya [Fundamentals of Processing Metal Products with Optical Properties: Monograph]. Kharkiv, Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, 2015. – 388 s.
6. Yakimov A. V. Optimizatsiya protsessa shlifovaniya [Optimization of the grinding process]. Moskva, Mashinostroyeniye, 1975. 175 s.
7. Novikov F. V., Andilakhay A. A., Sergeev A. S. Usloviya umen'sheniya sherokhovatosti poverkhnosti pri finisnoy abrazivnoy obrabotke otverstiy v tsilindrakh [Conditions for reducing surface roughness during finishing abrasive treatment of holes in cylinders]. Kachestvo, standartizatsiya, kontrol': teoriya i praktika: Materialy 19-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, 09–13 sentyabrya 2019, g. Odessa [Quality, standardization, control: theory and practice: Materials of the 19th International Scientific and Practical Conference, September 09–13, 2019, Odessa.]. Kiyev, ATM Ukraina, 2019. S. 96–98.

Поступила (received) 01.11.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Сергеев Александр Сергійович (Сергеев Александр Сергеевич, Serhieiev Alexander) – аспірант кафедри «Технологія машинобудування», ДВНЗ «ПДТУ», м. Маріуполь; тел.: 067-68-90-342; e-mail: fokusnic1@rambler.ru

Дитиненко Станіслав Александрович (Дитиненко Станислав Александрович, Ditinenko Stanislav) – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Природоохоронні технології, екологія та безпека життєдіяльності» Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця, м. Харків; тел.: +38-0678924575; e-mail: fokusnic1@rambler.ru ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5382-2276>

Новиков Федір Васильович (Новиков Федор Васильевич, Novikov Fedir) – доктор технічних наук, професор кафедри «Природоохоронні технології, екологія та безпека життєдіяльності» Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця, м. Харків; тел.: (0572) 69-55-62; e-mail: novikovfv@i.ua ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6996-3356>