

DOI: 10.15593/2224-9877/2016.4.03

УДК 691.795

В.А. Аксенов¹, А.С. Ильиных², М.С. Галай², А.В. Матафонов³

¹ Российская открытая академия транспорта Московского государственного университета путей сообщения, Москва, Россия

² Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

³ Центральная дирекция по ремонту пути – филиал ОАО «РЖД», Москва, Россия

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПЛОСКОГО ШЛИФОВАНИЯ ТОРЦОМ КРУГА ПРИ УПРУГОЙ ПОДВЕСКЕ ШЛИФОВАЛЬНОЙ ГОЛОВКИ

Посвящено экспериментально-теоретическому анализу процесса плоского шлифования торцом круга с учетом специфики упругой подвески шлифовальной головки. Показано принципиальное отличие силового замыкания кинематической цепи «абразивный круг – обрабатываемая поверхность» от геометрического. Особенность силового замыкания кинематической цепи заключается в самопроизвольном формировании глубины резания в процессе обработки в зависимости от ряда факторов: усилия прижатия, геометрии и физико-механических свойств обрабатываемой поверхности, режимов обработки и др. Представлена обобщенная математическая модель определения глубины резания при силовом замыкании кинематической цепи технологической системы. В разработанной модели установлена количественная взаимосвязь глубины резания шлифовальным кругом и комплекса указанных факторов. Полученные зависимости позволяют использовать глубину резания в качестве управляемого параметра механической обработки. Приведены результаты экспериментального подтверждения адекватности математической модели. Расхождение расчетных и экспериментальных данных не превышает 12 %. Показана возможность практической реализации полученных результатов исследований на примере технологического процесса шлифования рельсов с применением рельсошлифовальных поездов. Предложена методика назначения режимов механической обработки рельсов шлифованием. Промышленная апробация разработанной методики показала широкие возможности для повышения качества выполняемых работ в части увеличения точности формирования геометрического профиля рельсов и обеспечения требуемого уровня качества обработанной поверхности. Полученные результаты исследований позволили внести в технологию шлифования торцом круга с применением упругой подвески шлифовальной головки элемент управления, реализуемого в области оптимизации работы абразивного инструмента и повышения эффективности операции абразивной обработки в целом.

Ключевые слова: абразивная обработка, шлифование, глубина резания, технологическая система, технологический процесс, упругая подвеска, шлифовальная головка, кинематика резания, сила резания, режимы шлифования.

V.A. Aksenov¹, A.S. Ilinykh², M.S. Galay², A.V. Matafonov³

¹ Russian Academy of Transportation Opened at

Moscow State Transport University, Moscow, Russian Federation

² Siberian State Transport University, Novosibirsk, Russian Federation

³ Central Directorate for Track Repair – a Branch of JSC “Russian Railways”,
Moscow, Russian Federation

FEATURES OF FORMATION OF THE FLAT GRINDING TECHNOLOGICAL PROCESS BY AN END FACE OF A CIRCLE WITH AN ELASTIC SUSPENSION GRINDING HEAD

The article is devoted to experimental and theoretical analysis of the process of flat grinding by a wheel end face, taking into account the specifics of the elastic suspension of the grinding head. Difference between the power circuit of the kinematic and geometric chain “grinding wheel – machined surface” is shown. Feature of the power circuit of the kinematic chain is spontaneous formation depth of cutting during grinding process. The formation depth of cutting depends on such factors as contact pressure, the geometry and physic mechanical properties of the machined surface, cutting conditions, etc. A mathematical model for determining the depth of cutting at the power circuit of the kinematic chain of technological process is presented. The model showed quantitative correlation between the cutting depth of the grinding wheel and a complex of factors correlation. The received correlation allows to use cutting depth as a controlled parameter of machining. The results of experimental verification of the mathematical model are given. The deviation between calculated and experimental results does not exceed 12%. The possibility of practical implementation of the research results, using example of the technological process of grinding rails by rail-grinding trains, is shown. The method of setting cutting conditions for rail grinding is offered. Industrial testing of method showed opportunity to raise the quality of rail grinding work in terms of increasing the accuracy of formation geometric shape of rails and provide required level of quality of machined surface. The results of research allowed to make the grinding technology by wheel end face using elastic suspension grinding head control to be implemented in the field of optimization of the abrasive tool and improve the efficiency of the operation as a whole abrasive treatment.

Keywords: abrasive machining, grinding, cutting depth, technological system, technological process, elastic suspension, sanding head, kinematics of cutting, cutting force, cutting conditions of grinding.

Введение

В настоящее время в различных отраслях производства широко применяются операции плоского шлифования торцом круга. Эти операции осуществляются на плоскошлифовальных станках. На машиностроительных предприятиях, как правило, используются шлифовальные станки с геометрическим замыканием кинематической цепи «абразивный круг – обрабатываемая поверхность» (рис. 1, б) [1]. В этом случае глубина резания t шлифовальным кругом определяется настро-

ечным размером h между базовой поверхностью станка и абразивным инструментом. Жесткость и виброустойчивость такой схемы позволяет обеспечить высокую геометрическую и размерную точность, а также высокое качество обработанной поверхности. При этом глубина резания t является параметром известным и при формировании технологического процесса учитывается при назначении режимов резания [2].

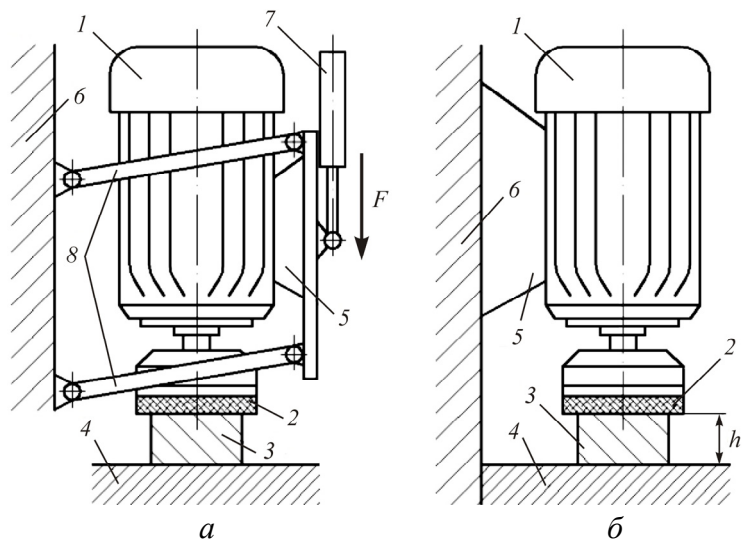


Рис. 1. Принципиальные схемы шлифования торцом круга: 1 – шлифовальный электродвигатель; 2 – шлифовальный круг; 3 – обрабатываемая деталь; 4 – базовая поверхность; 5 – подмоторная плита; 6 – станина; 7 – пневмоцилиндр; 8 – параллелограммный механизм

Кроме классических плоскошлифовальных станков существует и специализированное оборудование, также работающее по принципу плоского шлифования торцом круга, но имеющее принципиальное отличие, заключающееся в силовом замыкании кинематической цепи «абразивный круг – обрабатываемая поверхность» (рис. 1, а). При такой схеме шлифовальный круг 2 прижимается к обрабатываемой поверхности пневмоцилиндром 7 через приводной электродвигатель 1, закрепленный на подмоторной плите 5 параллелограммной подвески 8. Такая конструкция обеспечивает строго вертикальное опускание и поднятие шлифовальной головки. Усилие прижатия F шлифовального круга к обрабатываемой поверхности определяется давлени-

ем в пневмоцилиндре, которое автоматически регулируется в зависимости от токовой нагрузки на обмотках электродвигателя. Ярким примером применения такой схемы шлифования является оборудование для профилирования головки рельсов, используемое как в стационарных условиях, на рельсосварочных предприятиях, так и на специализированных машинах на железнодорожном ходу [3].

На высокую точность обработки данная схема не претендует, а эффективность ее применения определяется прежде всего повышенной производительностью. Недостатком силового замыкания является невозможность назначения глубины резания t в качестве исходных данных. Глубина резания самопроизвольно формируется в процессе обработки в зависимости от ряда факторов: усилия прижатия, геометрии и физико-механических свойств обрабатываемой поверхности, режимов обработки и др. Всё это приводит к снижению эффективности шлифования с применением данной схемы по причине нерациональной работы абразивного инструмента.

Для устранения указанного недостатка при формировании технологического процесса с применением упругой подвески шлифовальной головки необходимо создать теоретическую основу, позволяющую использовать глубину резания в качестве назначаемого и управляемого параметра, позволяющего устанавливать максимально эффективные режимы работы абразивного инструмента [4].

Теория

Основным параметром, определяющим эффективность процесса шлифования, является глубина среза единичным абразивным зерном. Для ее нахождения воспользуемся известной формулой, определяющей объем металла, удаляемого за проход шлифовальным кругом [5]: $V = B \cdot L \cdot t$, где B – ширина дорожки шлифования, мм; L – длина обрабатываемого участка пути, мм; t – глубина резания шлифовальным кругом, мм.

Этот же объем удаленного металла представим выражением [6]

$$V = 2a_{\text{ср}}^2 \cdot \text{tg } \gamma \cdot \mu \cdot L \cdot B, \quad (1)$$

где $a_{\text{ср}}$ – средняя глубина единичных срезов абразивными зёрнами, мм; γ – передний угол режущей части абразивного зерна, град; μ – концентрация единичных срезов по длине обработанной поверхности, шт./мм.

Приравняв эти два объема, определили среднюю глубину среза единичными зернами по формуле

$$a_{\text{ср}} = \sqrt{\frac{t}{2 \cdot \mu \cdot \text{tg } \gamma}}, \quad (2)$$

в которой определяющим параметром является концентрация единичных рисок по длине обработанной поверхности μ , которую можно определить по формуле $\mu = \tau \cdot v_{\text{ср}} \cdot Z$, где Z – концентрация зерен на рабочей поверхности шлифовального круга, шт./мм² [7]. Проведенный кинематический анализ [6] позволил определить время, за которое шлифовальный круг проходит расстояние для полной обработки поверхности: $\tau = [120 \cdot (R_{\text{кр}} - r_{\text{кр}})] / S_{\text{п}}$, где $R_{\text{кр}}$ – наружный радиус шлифовального круга, мм; $r_{\text{кр}}$ – внутренний радиус шлифовального круга, мм; $S_{\text{п}}$ – продольная минутная подача, м/мин. С учетом полученных выражений среднюю глубину среза единичными зернами определили по формуле

$$a_{\text{ср}} = \sqrt{\frac{t \cdot S_{\text{п}}}{80 \cdot \text{tg } \gamma \cdot v_{\text{ср}} \cdot (R_{\text{кр}} - r_{\text{кр}}) \cdot Z}}, \quad (3)$$

где $v_{\text{ср}}$ – средняя скорость движения зерен, расположенных на разном расстоянии от оси вращения круга, м/с.

Анализ полученной зависимости показал, что влияние режимных факторов на глубину срезов абразивными зернами в равной степени одинаково на всем диапазоне их изменения. Увеличение одного из параметров в два раза при постоянных других приводит к изменению $a_{\text{ср}}$ в среднем в 1,4 раза [6].

Определение рациональных значений возможного повышения режимных параметров шлифования требует рассмотрения кинематики процесса в комплексе с силовой моделью процесса шлифования рельсов [8].

С точки зрения обеспечения максимальной производительности задача, решаемая силовой моделью, сводится к определению максимально возможной глубины единичного среза $a_{\text{кр}}$, превышение которой приводит к вырыванию абразивного зерна из связки шлифовального круга [9].

Как отмечено в исследованиях А.В. Королева [10], наиболее опасными являются растягивающие напряжения в связке, которые в большей степени определяются тангенциальной составляющей силы резания, значение которой можно определить, воспользовавшись моделью, разработанной С.Н. Корчаком [11]. Согласно этой модели сила, действующая на единичное абразивное зерно, F' является суммой тангенциальных сил от напряжения пластического сдвига и трения о заднюю поверхность зерна. С учетом принятых моделей формула для определения тангенциальной составляющей силы резания будет иметь следующий вид:

$$F'_z = 2K_1 \cdot \tau_c \cdot a_{\text{ср}}^2 \cdot \text{tg } \gamma, \quad (4)$$

где τ_c – касательные напряжения, при которых происходит сдвиг в зоне деформации, МПа; $K_1 = \sqrt{3,25 \cos \beta_1 / \sin \beta}$, где β_1 – угол между линией среза и направлением равнодействующей от сил пластического деформирования срезаемого слоя; β – угол между плоскостью сдвига и линией среза.

Критическую нагрузку, вырывающую зерно из связки шлифовального круга, с достаточной степенью точности определили по формуле [12]

$$F_{\text{св}} = \frac{\pi \cdot d_3^2 \cdot \sigma_{\text{св}} \cdot K_{\text{стр}}}{8}, \quad (5)$$

где d_3 – диаметр абразивного зерна шлифовального круга, мм; $\sigma_{\text{св}}$ – предельная величина напряжений материала связки на растяжение, МПа; $K_{\text{стр}}$ – коэффициент структуры шлифовального круга, учитывающий наличие пор в зоне контакта абразивного зерна со связкой.

Если считать соотношение (4) справедливым для критических значений параметров среза $a_{\text{кр}}$, произведем замену в этом соотношении $a_{\text{ср}}$ на $a_{\text{кр}}$. С учетом принятого допущения приравняем правые части формул (4) и (5), а полученное уравнение решим относительно $a_{\text{кр}}$:

$$a_{\text{кр}} = \sqrt{\frac{\pi \cdot d_3^2 \cdot \sigma_{\text{св}} \cdot K_{\text{стр}}}{16 \cdot K_1 \cdot \tau_c \cdot \text{tg } \gamma}}. \quad (6)$$

Таким образом, получена зависимость, определяющая максимально возможное значение глубины единичного среза, при котором

происходит вырывание острого абразивного зерна из связки шлифовального круга [6].

Максимально возможная глубина резания шлифовальным кругом определена из расчета критической нагрузки на единичное зерно. Для этого приравнивали величину $a_{кр}$, рассчитанную из условия прочности закрепления зерна в связке (6), к величине a_{max} , определенную по кинематическим параметрам (3), а полученное уравнение решили относительно t :

$$t = \frac{1,25 \cdot \pi \cdot d_3^2 \cdot \sigma_{св} \cdot K_{стр} \cdot v_{ср} \cdot (R_{кр} - r_{кр}) \cdot Z}{K_1 \cdot \tau_c \cdot S_{п}}. \quad (7)$$

Полученная формула устанавливает связь глубины резания шлифовальным кругом с кинематическими и силовыми параметрами процесса шлифования, характеристикой шлифовального круга и обрабатываемого материала и позволяет рассчитывать глубину резания шлифовальным кругом при работе инструмента в режиме самозатачивания. Величина глубины резания, полученная по данной формуле, позволяет обеспечить максимальную производительность шлифования. При этом полученное значение t является предельно допустимым, а его превышение приведет к катастрофическому износу абразивного инструмента [6].

Методика экспериментального исследования

Для оценки справедливости полученной зависимости проведен эксперимент, целью которого ставилось сравнение расчетных значений максимально возможной глубины резания $t_{расчет}$ с фактически полученными значениями t при шлифовании. Исследования проводились на специально изготовленной установке [13], на шлифовальных кругах, изготовленных с использованием циркониевого электрокорунда на бакелитовой связке пяти различных рецептур производства компании «Абразивные заводы Урала» [14].

Методика проведения эксперимента заключалась в изменении усилия прижатия шлифовального круга к обрабатываемой поверхности при постоянной скорости резания и продольной подачи в соответствии со значениями, принятыми в расчете. Усилие прижатия позволяло изменять глубину резания, фактическое значение которой определялось измерением обрабатываемой поверхности до и после шлифования [6].

В качестве критерия, определяющего оптимальность глубины резания, был принят коэффициент шлифования $K_{ш}$, характеризующий отношение объема удаленного металла к объемному износу инструмента. В соответствии с этим для каждого шлифовального круга было рассчитано значение $K_{ш}$. Значение глубины резания, соответствующее максимальному коэффициенту шлифования, являлось наиболее эффективным, и это значение сравнивалось с расчетным [6].

Результаты и обсуждения

Проведенный эксперимент показал, что для максимального коэффициента шлифования $K_{ш}$ (рис. 2) расхождение фактически полученных значений глубины резания t с расчетными значениями $t_{расчет}$ в среднем составляет 12 %. Так, наибольшие расхождения результатов 17,5 и 13,1 % отмечены при исследовании шлифовальных кругов с максимальной зернистостью соответственно 200 и 160 мкм. Минимальное отклонение 7,9 % зафиксировано при наименьшей зернистости инструмента 100 мкм.

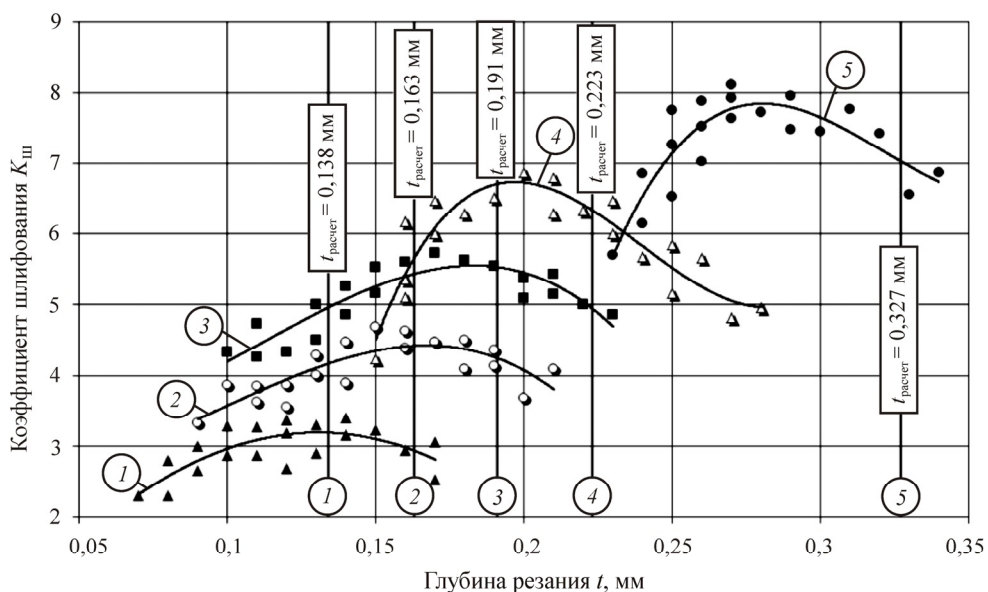


Рис. 2. Влияние глубины резания на коэффициент шлифования.

Марки шлифовальных кругов: 1 – 35-250×76×150 38A 160 ЧТ2 БУ; 2 – 35-250×76×150 38A 100 Т1 БУ; 3 – 35-250×76×150 38A 125 СТ3 БУ; 4 – 35-250×76×150 38A 125 ВТ1 БУ; 5 – 35-250×76×150 38A 200 ЧТ2 БУ

На графиках видно, что экстремумы экспериментальных кривых смещены относительно расчетных прямых в сторону уменьшения глубины резания (см. рис. 2). Это говорит о более высоких значениях сил резания, действующих на шлифовальный круг, нежели значения сил резания, определенные в расчете.

На основе проведенных исследований можно сделать вывод, что аналитическая модель определения оптимальной глубины резания, с учетом выявленных особенностей расчета, может использоваться на начальных этапах проектирования технологического процесса шлифования и с достаточной точностью определять режимные области обработки с учетом кинематических и силовых параметров.

Практическая реализация

Полученные результаты исследований были апробированы при проектировании технологического процесса шлифования рельсов на рельсошлифовальном поезде РШП-48. При этом необходимо было учитывать тот факт, что основным критерием эффективности процесса шлифования рельсов является производительность обработки в силу условий эксплуатации железнодорожного пути.

Очевидно, при профильном шлифовании рельсов, так же как и при других видах шлифования, высокие скорости не всегда будут эффективны. Необходимо найти область рационального применения высоких скоростей резания, разработать технологические рекомендации по их применению.

Для реализации этой задачи была разработана методика проектирования технологического процесса шлифования рельсов с учетом полученных результатов математического моделирования. В общем виде указанную методику можно описать следующими этапами [15, 16]:

1. Формирование исходных данных (характеристики абразивного инструмента и рабочего оборудования, параметры обрабатываемого участка пути и требования по формированию качества поверхности рельсов на данном участке, база ремонтных профилей рельсов).

2. В соответствии с характеристикой абразивного инструмента, из условия критической силы резания, определяется максимальная глубина резания, которая, с учетом выбранного ремонтного профиля рельса, определяет количество проходов и фактическую глубину резания на каждом проходе для каждого шлифовального круга.

3. Устанавливаются режимы шлифования, определяющие максимальную производительность обработки. По заданным режимам шлифования рассчитываются параметры качества поверхности после обработки.

4. Производится сравнение расчетных значений параметров качества поверхности с требуемыми значениями, и при несоблюдении условий создается цикл по корректировке режимов шлифования в сторону уменьшения производительности. Значения режимов шлифования, удовлетворяющие всем условиям, задают контрольные параметры рабочего оборудования: силу тока шлифовальных электродвигателей и давление в пневмосистеме прижатия шлифовальных кругов. Полученные значения формируют технологический процесс шлифования рельсов.

Разработанная методика проектирования технологических процессов шлифования рельсов, реализующая принцип оптимизации комплекса параметров механической обработки для обеспечения повышенного уровня эксплуатационных свойств рельсов с максимальной производительностью, позволила реализовать принципиально новый подход в планировании технологических воздействий, выборе режимов и условий шлифования, заключающийся в обеспечении требуемых параметров качества поверхности с максимальной производительностью. Реализация данного подхода была бы не возможна без возможности назначения глубины резания на стадии формирования технологического процесса.

Заключение

Разработанная модель процесса шлифования торцом круга, учитывающая особенность нестационарной обработки, заключающейся в упругой подвеске шлифовальной головки, позволила выявить взаимосвязи параметров технологического процесса и использовать глубину резания t в качестве управляемого параметра механической обработки.

Полученные результаты позволили внести в технологию шлифования торцом круга с применением упругой подвески шлифовальной головки элемент управления, реализуемого в части оптимизации работы абразивного инструмента.

Список литературы

1. Лурье Г.Б., Комиссаржевская В.Н. Шлифовальные станки и их наладка. – М.: Высш. шк., 1972. – 415 с.
2. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов. – М.: Машиностроение, 1974. – 320 с.
3. Функе Х. Шлифовка рельсов. – М.: Транспорт, 1992. – 169 с.
4. Ильиных А.С., Матафонов А.В. Влияние особенностей конструкции рабочего оборудования рельсошлифовального поезда на процесс обработки рельсов // Политранспортные системы: материалы VIII Междунар. науч.-техн. конф. в рамках года науки Россия–ЕС / Сиб. гос. ун-т путей сообщения. – Новосибирск, 2015. – С. 567–571.
5. Островский В.Н. Теоретические основы процесса шлифования. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1981. – 143 с.
6. Ильиных А.С. Научно-методические основы высокопроизводительной технологии шлифования рельсов в условиях железнодорожного пути // Вестник Саратов. гос. техн. ун-та. – 2013. – № 1(69). – С. 89–95.
7. Евсеев Д.Г., Сальников А.Н. Физические основы процесса шлифования / Саратов. гос. ун-т. – Саратов, 1978. – 129 с.
8. Оробинский В.М. Абразивные методы обработки и их оптимизация. – М.: Наука, 2000. – 312 с.
9. Аксенов В.А., Ильиных А.С. Теплофизический анализ процесса плоского шлифования рельсов торцом круга // Вестник Юж.-Урал. гос. ун-та. Сер.: Машиностроение. – 2012. – № 33. – С. 96–100.
10. Королев А.В., Новоселов Ю.К. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки. – Саратов: Изд-во Саратов. гос. ун-та, 1987. – 156 с.
11. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. – М.: Машиностроение, 1974. – 280 с.
12. Ильиных А.С. Разработка абразивного инструмента для скоростного шлифования рельсов // Технология машиностроения. – 2013. – № 3. – С. 26–30.
13. Ильиных А.С., Григорьев В.М. Повышение эффективности профильного шлифования рельсов на основе применения новой схемы резания // Науч. вестник Новосиб. гос. техн. ун-та. – 2007. – № 3. – С. 191–196.

14. Ильиных А.С. Формирование качества поверхности при плоском шлифовании торцом круга // *Технология машиностроения*. – 2011. – № 4. – С. 19–22.

15. Применение системы менеджмента качества при проектировании технологических процессов шлифования рельсов / В.А. Аксенов, А.С. Ильиных, А.В. Матафонов, М.С. Галай // *Ползуновский вестник*. – 2014. – Т. 2, № 4. – С. 163–167.

16. Матафонов А.В., Пыко А.Н., Ильиных А.С. Технологическое обеспечение качества поверхности рельсов при шлифовании в условиях железнодорожного пути // *Вестник Юж.-Урал. гос. ун-та. Сер.: Машиностроение*. – 2015. – № 1. – С. 80–92.

References

1. Lur'e G.B., Komissarzhevskaja V.N. Shlifoval'nye stanki i ikh naladka [Grinders and their adjustment]. Moscow: Vysshaya shkola, 1972. 415 p.

2. Maslov E.N. Teoriya shlifovaniya materialov [Theory of grinding of materials]. Moscow: Mashinostroenie, 1974. 320 p.

3. Funke Kh. Shlifovka rel'sov [Grinding of rails]. Moscow: Transport, 1992. 169 p.

4. Il'nykh A.S., Matafonov A.V. Vliyanie osobennosti konstruktsii rabocheho oborudovaniya rel'soshlifoval'nogo poezda na protsess obrabotki rel'sov [Influence of features of a design of the working equipment of the relsoshlifovalny train on processing of rails]. *Materialy VIII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii v ramkakh goda nauki Rossiya–ES "Politransportnye sistemy"*. Novosibirsk: Sibirskii gosudarstvennyi universitet putei soobshcheniya, 2015, pp. 567-571.

5. Ostrovskii V.N. Teoreticheskie osnovy protsessa shlifovaniya [Theoretical bases of process of grinding]. Leningradskii gosudarstvennyi universitet, 1981. 143 p.

6. Il'nykh A.S. Nauchno-metodicheskie osnovy vysokoproizvoditel'noi tekhnologii shlifovaniya rel'sov v usloviakh zheleznodorozhnogo puti [Scientific and methodical bases of high-performance technology of grinding of rails in the conditions of a railway track]. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013, no. 1(69), pp. 89-95.

7. Evseev D.G., Sal'nikov A.N. Fizicheskie osnovy protsessa shlifovaniya [Physical bases of process of grinding]. Saratovskii gosudarstvennyi universitet, 1978. 129 p.

8. Orobinskii V.M. Abrazivnye metody obrabotki i ikh optimizatsiia [Abrasive methods of processing and their optimization]. Moscow: Nauka, 2000. 312 p.

9. Aksekov V.A., Il'inykh A.S. Teplofizicheskii analiz protsessa ploskogo shlifovaniia rel'sov tortsom kruga [Heatphysical analysis of process of flat grinding of rails circle end face]. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Mashinostroenie*, 2012, no. 33, pp. 96-100.

10. Korolev A.V., Novoselov Iu.K. Teoretiko-veroiatnostnye osnovy abrazivnoi obrabotki [Probability-theoretic bases of abrasive processing]. Saratovskii gosudarstvennyi universitet, 1987. 156 p.

11. Korchak S.N. Proizvoditel'nost' protsessa shlifovaniia stal'nykh detalei [Productivity of process of grinding of steel details]. Moscow: Mashinostroenie, 1974. 280 p.

12. Il'inykh A.S. Razrabotka abrazivnogo instrumenta dlia skorostnogo shlifovaniia rel'sov [Development of the abrasive tool for high-speed grinding of rails]. *Tekhnologiya mashinostroeniia*, 2013, no. 3, pp. 26-30.

13. Il'inykh A.S., Grigor'ev V.M. Povyshenie effektivnosti profil'nogo shlifovaniia rel'sov na osnove primeneniia novoi skhemy rezaniia [Increase in efficiency of profile grinding of rails on the basis of application of the new scheme of cutting]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2007, no. 3, pp. 191-196.

14. Il'inykh A.S. Formirovanie kachestva poverkhnosti pri ploskom shlifovanii tortsem kruga [Formation of quality of a surface at flat grinding tortsya a circle]. *Tekhnologiya mashinostroeniia*, 2011, no. 4, pp. 19-22.

15. Aksekov V.A., Il'inykh A.S., Matafonov A.V., Galai M.S. Primenenie sistemy menedzhmenta kachestva pri proektirovanii tekhnologicheskikh protsessov shlifovaniia rel'sov [Application of a quality management system when designing engineering procedures of grinding of rails]. *Polzunovskii vestnik*, 2014, vol. 2, no. 4, pp. 163-167.

16. Matafonov A.V., Pyko A.N., Il'inykh A.S. Tekhnologicheskoe obespechenie kachestva poverkhnosti rel'sov pri shlifovanii v usloviakh zheleznodorozhnogo puti [Technological support of quality of a surface of rails when grinding in the conditions of a railway track]. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Mashinostroenie*, 2015, no. 1, pp. 80-92.

Получено 22.06.2016

Об авторах

Аксенов Владимир Алексеевич (Москва, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой техносферной безопасности Российской открытой академии транспорта Московского государственного университета путей сообщения; e-mail: v.aksenov@rgotups.ru.

Ильиных Андрей Степанович (Новосибирск, Россия) – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии транспортно-машиностроения и эксплуатации машин Сибирского государственного университета путей сообщения; e-mail: asi@stu.ru.

Галай Марина Сергеевна (Новосибирск, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии транспортно-машиностроения и эксплуатации машин Сибирского государственного университета путей сообщения; e-mail: galaums@stu.ru.

Матафонов Алексей Валерьевич (Москва, Россия) – начальник отдела охраны труда, промышленной безопасности и экологии Центральной дирекции по ремонту пути – филиала ОАО «РЖД».

About the authors

Vladimir A. Aksenov (Moscow, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Technosphere Safety, Russian Academy of Transportation Opened at Moscow State Transport University; e-mail: v.aksenov@rgotups.ru.

Andrey S. Ilinykh (Novosibirsk, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Technology of Transport Engineering and Maintenance of Machinery, Siberian State Transport University; e-mail: asi@stu.ru.

Marina S. Galay (Novosibirsk, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Technology of Transport Engineering and Maintenance of Machinery, Siberian State Transport University; e-mail: galayms@stu.ru.

Aleksey V. Matafonov (Moscow, Russian Federation) – Head of Department of Labor Protection, Industrial Safety and the Environment, Central Directorate for Track Repair – a Branch of JSC “Russian Railways”.