

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.923

doi: 10.30987/2782-5957-2025-7-11-18

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ С УЧЕТОМ СПОСОБА ПРАВКИ ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА

Сергей Геннадьевич Бишути^{1✉}, Анатолий Васильевич Тотай², Владимир Павлович Федоров³, Максим Николаевич Нагоркин⁴

^{1,2,3,4} Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия

¹ nad-bisch@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9430-2936>

² totai_av@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4794-9881>

³ fedorvlad44@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2113-6567>

⁴ nagorkin_mn@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4536-7522>

Аннотация

В статье представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния способов правки шлифовальных кругов на высотные и шаговые параметры шероховатости обработанных поверхностей деталей. Представлены аналитические зависимости для расчёта параметров шероховатости поверхностей заготовок, обработанных шлифованием после различных способов правки абразивных кругов, достоверность которых подтверждена экспериментальными исследованиями. Установлено, что для обеспечения шлифованием шероховатости поверхности с высотным параметром Ra менее 0,4 мкм рекомендуется применять правку абразивного круга однокристальным алмазным инструментом (алмаз в оправе, алмазный карандаш). Для обеспечения шероховатости с параметром Ra в диапазоне 0,4 – 0,8 мкм рекомендуется осуществлять правку шлифовального круга роликом или многокристальным алмазным карандашом. Правка шлифовальных кругов твердосплавными дисками позволит обеспечить шероховатость поверхности после обработки с параметром Ra более

0,8 мкм. Установлено, что на шаговые параметры шероховатости поверхностей заготовок, обработанных шлифованием, значимое влияние оказывает радиус скругления вершин абразивных зёрен. При этом среднее значение шага неровностей профиля шероховатости по средней линии Sm в 2 – 3 раза больше среднего значения шага S местных выступов профиля шероховатости. Поэтому формирование микронеровностей поверхности с заданным соотношением высотных и шаговых параметров возможно путём подбора зернистости шлифовального круга, влияющей на радиус скругления вершин зёрен. Представлены научно обоснованные рекомендации по выбору методов правки абразивных инструментов и условий технологического обеспечения параметров шероховатости поверхностей заготовок, обрабатываемых методами шлифования периферией круга.

Ключевые слова: шлифование, круг, правка, инструмент, вершина, абразивное зерно, параметры, шероховатость.

Ссылка для цитирования:

Бишутин С.Г. Прогнозирование параметров шероховатости обработанной поверхности с учетом способа правки шлифовального круга / С.Г. Бишутин, А.В. Тотай, В.П. Федоров, М.Н. Нагоркин // Транспортное машиностроение. – 2025. - № 7. – С. 11-18. doi: 10.30987/2782-5957-2025-7-11-18.

Original article

Open Access Article

PREDICTION OF ROUGHNESS PARAMETERS OF THE TREATED SURFACE TAKING INTO ACCOUNT A DRESSING METHOD OF THE GRINDING WHEEL

Sergey Gennadyevich Bishutin^{1✉}, Anatoly Vasilyevich Totay², Vladimir Pavlovich Fedorov³,
Maksim Nikolaevich Nagorkin⁴

© Бишутин С. Г., Тотай А. В., Федоров В. П., Нагоркин М. Н., 2025

Abstract

The paper presents the results of theoretical and experimental studies of the effect of grinding wheel dressing methods on the height and pitch parameters of the roughness of the part surfaces treated. Analytical dependences are presented for calculating the roughness parameters of the surfaces of workpieces treated by grinding after various methods of dressing abrasive wheels, the reliability of which is confirmed by experimental studies. It is found out that in order to ensure surface roughness with a height parameter Ra of less than 0.4 microns, it is recommended to use an abrasive wheel dressing with a single-crystal diamond tool (diamond in a rim, diamond pencil). To ensure roughness with the parameter Ra in the range of 0.4 – 0.8 microns, it is recommended to dress the grinding wheel with a roller or a multi-crystal diamond pencil. Dressing the grinding wheels with carbide discs will ensure surface roughness after treatment with Ra parameter of

more than 0.8 microns. It is found out that the radius of rounding of the tops of abrasive grains has a significant effect on the step parameters of the roughness of workpiece surfaces treated by grinding. At the same time, the average step value of the roughness profile irregularities along Sm mean line is 2-3 times greater than the average step value S of the local protrusions of the roughness profile. Therefore, the formation of fine irregularities of the surface with a given ratio of height and pitch parameters is possible by selecting the grain size of the grinding wheel, which affects the radius of rounding of the grain vertices. The paper presents scientifically based recommendations on the choice of methods for dressing abrasive tools and the conditions for maintenance of the roughness parameters of the workpiece surfaces processed by grinding wheel face.

Keywords: grinding, wheel, dressing, tool, tip, abrasive grain, parameters, roughness.

Reference for citing:

Bishutin SG, Totay AV, Fedorov VP, Nagorkin MN. Prediction of roughness parameters of the treated surface taking into account a dressing method of the grinding wheel. *Transport Engineering*. 2025;7:11-18. doi: 10.30987/2782-5957-2025-7-11-18.

Введение

Качество поверхности детали, обработанной методом шлифования в значительной степени определяется состоянием рабочей поверхности шлифовального круга, которое формируется в процессе правки этого абразивного инструмента [1, 2]. Варьирование условий правки шлифовального круга может приводить к изменению в 1,5...2,5 раза значений параметров шероховатости поверхности [3, 4]. Имеющиеся в современной научной литературе рекомендации по выбору способов и режимов правки шлифовальных кругов не позволя-

ют определить численные значения интересуемых высотных и шаговых параметров шероховатости обрабатываемой поверхности на стадии проектирования технологической операции шлифования. В связи с этим, представленные в статье исследования, посвящённые научно обоснованному выбору способов правки шлифовальных кругов и режимов обработки заготовок для обеспечения требуемых параметров шероховатости поверхностей, являются актуальными.

Моделирование процессов формирования шероховатости поверхностей шлифованием

На рис. 1 представлена схема круглого шлифования периферией круга поверхности заготовки.

На рис. 1 представлена схема круглого шлифования периферией круга поверхности заготовки с толщиной a_z , контуры которых образуют поперечную шероховатость 7.

Обработка заготовки 4 осуществляется шлифовальным кругом со скоростью D_r и подачей D_s . Абразивные зёरна 2, расположенные на периферии и торцах инструмента и соединенные с помощью связки 5, режущими вершинами 6 с радиусом скругления ρ формируют на обраба-

тываемой поверхности срезы 3 толщиной a_z , контуры которых образуют поперечную шероховатость 7.

Исследование топографии поверхности заготовки, обработанной шлифованием, показывает, что она представляет собой совокупность параллельных друг другу рисок-царапин, длина которых в десятки и сотни раз больше их ширины и глубины (рис. 2).

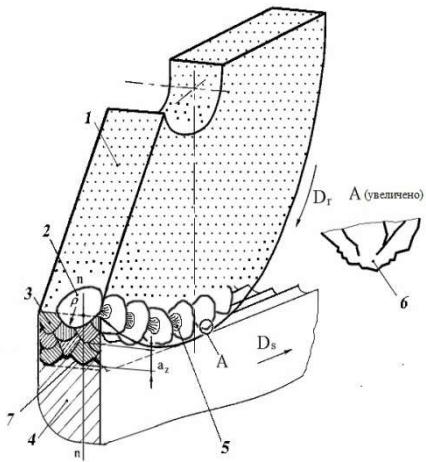


Рис.1. Схема процесса шлифования

поверхности заготовки

Fig. 1. Scheme of the workpiece surface grinding process



Рис. 2. Топография поверхности заготовки после шлифования

Fig. 2. Surface topography of the workpiece after grinding

При шлифовании по другим схемам процессы формирования профиля шероховатости принципиально отличаться не будут.

Анализ схемы процесса шлифования поверхности заготовки показывает, что на процесс формирования профиля шероховатости значительное влияние оказывают геометрическая форма и число зёрен абразивного инструмента, которые контактируют с обрабатываемой поверхностью, и распределение вершин зерен по высоте [4, 5].

Таким образом, для прогнозирова-

ния значений параметров шероховатости поверхности после шлифования заготовок необходимо знать:

– зависимость значений параметров шероховатости (например, Rz) от числа зёрен, участвующих в формировании микропрофиля, радиуса скругления вершин зерен и распределения их по высоте;

– зависимость, характеризующую влияние технологических факторов обработки на число зёрен, контактирующих с обрабатываемой поверхностью при шлифовании.

Совместное решение этих зависимостей, установленных в различных исследованиях, позволило получить следующее соотношение для параметра шероховатости Rz :

$$Rz = C\rho^k m^n t^f, \quad (1)$$

где C, k, n, f – коэффициенты, значения которых зависят взаимного расположения рабочей поверхности абразивного инструмента и обрабатываемой поверхности; ρ – среднее значение радиуса скругления вершин абразивных зёрен, находящихся на рабочей поверхности шлифовального круга (зависит от размера зёрен и их материала, степени их износа); m – число вершин зёрен, проходящих через участок поверхности обработки за единицу времени; t – толщина удаляемого слоя металла за один рабочий ход инструмента.

Уравнение (1) позволяет прогнозировать значения параметров шероховатости после шлифования поверхностей заготовок различными методами.

Например, для круглого шлифования периферией круга (наружного и внутреннего) и плоского шлифования уравнение (1) после ряда преобразований принимает следующий вид [4, 5]:

$$Rz = \frac{150\rho^{-0,25}t^{0,5}}{\left(k_A m \frac{V_E}{V_C} A^{0,5} q \left[0,62 \frac{N}{V} \right]^{-2} F_c H \right)^{0,5}} k_C, \quad (2)$$

где t – глубина резания; k_C – коэффициент, учитывающий вид применяемого смазочно-охлаждающего технологического сред-

ства; k_B – коэффициент, учитывающий влияние колебаний рабочей поверхности инструмента относительно поверхности

обработки; m – коэффициент, учитывающий число абразивных зёрен на рабочей поверхности; V_K – скорость вращения круга; V_3 – скорость вращения заготовки; A – коэффициент учитывающий диаметр заготовки D_3 и диаметр круга D_K : при круглом (+) или внутреннем (–) шлифования периферией круга $A = D_3 D_K / (D_3 \pm D_K)$, при плоском шлифовании $A = D_K$; q – коэффициент, учитывающий вид микрорельефа вершин абразивных зёрен; N – зернистость шлифовального круга; V – объёмное содержание зёрен в круге; F_C – доля зёрен на рабочей поверхности инструмента, вершины которых формируют профиль шероховатости поверхности обработки; H – число контактов участка поверхности заготовки с абразивным инструментом в зависимости от режимов обработки и времени выхаживания.

Анализ уравнения (2) показывает, что на формирование высотных параметров шероховатости наибольшее влияние оказывают зернистость шлифовального круга, объёмное содержание зёрен, скорость обработки, время выхаживания поверхности.

Другие параметры шероховатости рассчитываются по зависимостям (3), учи-

Оценка влияния правки шлифовальных инструментов на состояние их рабочих поверхностей

Для оценки состояния рабочей поверхности абразивного инструмента применяют интегральную функцию $F_\Sigma(z)$, которая учитывает распределение по глубине z поверхности вершин абразивных зёрен.

В исследованиях [5, 7] показано, что для рабочей поверхности шлифовального круга после правки функция $F_\Sigma(z)$ может принимать значения в пределах от 0 до 1.

$$F_C = \begin{cases} \left(A^* + BC / [0,008N] \right) \frac{t}{E}, & 0 \leq t \leq E; \\ \left(A^* + BC / [0,008N] \right) \left(1 + 0,2 \frac{t-E}{E} \right), & t \geq E. \end{cases} \quad (4)$$

Значения A^* , B , C зависят от характеристик шлифовального круга и являются расчётными величинами. Результаты расчёта этих величин представлены в табл. 1.

тывающим форму зоны контакта обрабатываемой поверхности с абразивным инструментом, кинематику процесса формообразования при обработке шлифованием, распределение профиля впадин шероховатости (шлифовочных царапин) по длине и высоте, радиус скругления вершин абразивных зёрен [5, 6]:

$$\left. \begin{aligned} Ra &= 0,15Rz \\ S &= 3,5 \cdot 10^{-3} (\rho Ra)^{0,5} \\ Sm &= 1 \cdot 10^{-2} (\rho Ra)^{0,5} \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

где Rz , Ra , S , Sm – параметры шероховатости.

Из уравнений (3) следует, что на соотношение высотных и шаговых параметров шероховатости шлифованной поверхности влияет радиус скругления вершин зёрен, который, в свою очередь, зависит от зернистости шлифовального инструмента.

Таким образом, параметр F_C в зависимости (2) учитывает разницу высот вершин зёрен на рабочей поверхности круга и, следовательно, зависит от способа и режима правки шлифовального инструмента. Определим зависимости для расчёта этого параметра.

Таким образом, задав назначая величину z , можно определить долю вершин зёрен рабочей поверхности шлифовального инструмента, от доли всех зёрен поверхностного слоя инструмента толщиной z .

Очевидно, что $F_C = F_\Sigma(t)$. В таком случае параметр F_C можно определить по зависимостям

Величина E в зависимости (4) определялась экспериментально. При проведении экспериментов электрокорундовый шлифовальный круг прямого профиля

устанавливался на станке ЗУ12В и подвергался правке алмазом в оправе (ГОСТ 22908-78), многокристальным алмазным

карандашом (ГОСТ 607-80), алмазным роликом (ГОСТ 16014-78) и твердосплавным диском (ГОСТ 4802-53).

Значения A^* , B и C для электрокорундовых шлифовальных кругов

Table 1

A^ , B and C values for aluminum oxide wheels*

Параметр	Твёрдость круга по ГОСТ Р 52587-2006, ГОСТ Р 52781-2007										
	H, I, J			K, L, M			N, O, P				
	Зернистость круга по ГОСТ 52381-2005 ГОСТ Р 52781-2007										
	F70 – 90	F54 – 60	F36 – 46	F70 – 90	F54 – 60	F36 – 46	F30	F70 – 90	F54 – 60	F36 – 46	
A^*	0,07	0,06	0,055	0,12	0,11	0,095	0,085	0,13	0,11	0,10	0,09
C	0,05	0,04	0,025	0,045	0,04	0,02	0,01	0,045	0,04	0,02	0,01
B	0,97	1,0	1,0	0,86	0,89	0,91	0,95	0,82	0,85	0,87	0,91

При правке объектом обработки являлся шлифовальный круг, а правящий инструмент, закреплённый в приспособлении на столе станка, перемещался вдоль шлифовального круга с определённой скоростью, удаляя его поверхностные слои за несколько ходов. С помощью алмаза в оправе и алмазного карандаша осуществлялось обтачивание шлифовального круга, а при помощи алмазного ролика и твердосплавного диска – обкатывание шлифовального круга. Правка круга осуществлялась при следующих режимах движения правящего инструмента: продольная подача – 0,25...0,3 м/мин; поперечная подача – 0,02 мм/дв. ход; число рабочих ходов – 4; число выхаживающих ходов – 2. Охлаждение правящего инструмента осуществлялась свободным поливом эмульсией.

Затем после внедрения специальных

свинцовых пластин в поверхность инструмента снимались отпечатки рабочей поверхности. Вершин абразивных зёрен формировали лунки различной глубины в пределах длины контакта пластин с абразивным инструментом. Вершины наиболее выступающих зёрен рабочей поверхности шлифовального инструмента формировали лунки максимальной глубины в центре зоны его контакта с пластиной.

Анализ отпечатков на пластинах проводился в соответствии с методикой, представленной в работе [7], после чего строились кривые $F_\Sigma(z)$, с помощью которых определялись численные значения величин E .

Полученные значения E представлены в табл. 2.

Значения E , мкм

Таблица 2

E values, microns

Table 2

Правящий инструмент		
Алмаз в оправе	Алмазный карандаш и ролик	Твердосплавной диск
10...15	20...30	35...50

Исследования показали, что минимальная разновысотность (не более 15 мкм) вершин зёрен наблюдается при правке однокристальным алмазным инструментом (алмазом в оправе). Большее значение разновысотности режущих вершин (20...30 мкм) обеспечивает правка алмазным карандашом и роликом. Макси-

мальная разновысотность вершин абразивных частиц (до 50 мкм) формировалась в процессе правки твердосплавным диском.

При меньшей величине E в поверхностном слое круга будет большее число вершин зёрен, что приведет к меньшей высоте микронеровностей поверхности. А при большем значении E будет формиро-

ваться более грубая шероховатость поверхности. Для подтверждения правильно-

сти теоретических изысканий был проведен ряд экспериментов.

Экспериментальная проверка теоретических результатов

При проведении экспериментов осуществлялась обработка цилиндрических образцов (сталь 45, HRC 42...45) шлифовальным кругом прямого профиля из электрокорунда зернистостью F46 методом продольной подачи.

Для стабилизации силового и термического воздействий на обрабатываемую поверхность в ходе проведения экспериментов и для устранения влияния технологической наследственности осуществлялось предварительное шлифование образцов для снятия дефектного слоя материала.

Перед каждым опытным экспериментом осуществлялась правка шлифовального круга одним из перечисленных ранее правящих инструментов с соответствующими режимами.

После того, как с рабочей поверхности шлифовального круга снимались отпечатки свинцовыми пластинами, цилиндри-

ческий образец, установленный в центрах шлифовального станка ЗУ12В, шлифовался с припуском 0,1 мм на сторону. При этом скорость вращения заготовки составила 25 м/мин, скорость вращения круга – 27 м/с, продольная подача – 0,75 м/мин, глубина шлифования – 10 мкм. Охлаждение зоны обработки производилось свободным поливом эмульсией.

Параметры шероховатости поверхностей образцов измерялись на профилографе-профилометре мод. БВ-7669М и их значения сравнивались с значениями параметров шероховатости, рассчитанными по зависимостям (2) – (4).

В табл. 3. представлены значения параметров шероховатости поверхностей образцов, обработанных шлифовальными кругами после различных видов правки, как полученные экспериментально, так и расчетные.

Значения параметров шероховатости поверхностей образцов, обработанных шлифованием абразивными инструментами после различных методов правки

Table 3

Values of roughness parameters of sample surfaces treated by grinding with abrasive tools after various dressing methods

Параметр шероховатости	Правящий инструмент		
	Алмаз в оправе	Алмазный карандаш и ролик	Твердосплавной диск
R_a , мкм	$0,35 \pm 0,03$ 0,4	$0,50 \pm 0,03$ 0,60	$0,85 \pm 0,04$ 0,90
R_z , мкм	$2,1 \pm 0,4$ 2,7	$2,9 \pm 0,3$ 4,0	$5,0 \pm 0,25$ 6,0
Sm , мкм	$37,6 \pm 3,0$ 35,0	$43,5 \pm 3,5$ 45,5	$48,5 \pm 2,8$ 54,5
S , мкм	$17,5 \pm 2,4$ 12,0	$20,0 \pm 2,5$ 15,2	$23,5 \pm 2,2$ 19,5

Примечания: в числителе указаны экспериментальные значения параметров шероховатости и их 95%-ные доверительные интервалы; в знаменателе указаны расчётные значения параметров шероховатости

Результаты экспериментов показывают, что способ правки шлифовального круга существенно влияет на значения параметров шероховатости поверхности. Из-

менения высотных параметров шероховатости находились в пределах от 2 до 2,5 раз. Шаговые параметры изменялись в 1,3...1,5 раза. Отношения между высот-

ными и шаговыми параметрами шероховатости поверхностей составили: $Rz / Ra = 6...6,5$; $Sm / S = 2...3$.

Экспериментальные значения па-

метров шероховатости отличались от рассчитанных по зависимостям (2) – (4) значений на 5...32 %, что можно считать приемлемым.

Заключение

Результаты проведенных исследований позволяют утверждать следующее:

1. Существенное влияние на формирование параметров шероховатости поверхностей деталей в процессе шлифования оказывают: способ правки шлифовального круга, скорость шлифования, зернистость инструмента и объемное содержание зёрен в круге, время выхаживания поверхности в процессе шлифования.

2. Для обеспечения при шлифовании высотного параметра шероховатости Ra менее 0,4 мкм следует применять правку однокристальным алмазным инструментом (алмазом в оправе или алмазной иглой).

3. При необходимости обеспечения параметра шероховатости Ra в пределах от 0,4 до 0,8 мкм шлифовальный круг целесообразно править многокристальным алмазным карандашом или роликом.

4. Для получения шероховатости обработанной поверхности с параметром Ra более 0,8 мкм в качестве правящего инструмента можно использовать твердо-

сплавные диски.

5. На шаговые параметры шероховатости поверхностей заготовок, обработанных шлифованием, значимое влияние оказывает радиус скругления вершин абразивных зёрен. При этом среднее значение шага неровностей профиля шероховатости по средней линии Sm в 2...3 раза больше среднего значения шага S местных выступов профиля шероховатости. Поэтому получение микронеровностей поверхности с заданным соотношением высотных и шаговых параметров возможно путём подбора зернистости шлифовального круга, влияющей на радиус скругления вершин зёрен.

Представленные результаты исследований позволяют проводить целенаправленный выбор способов правки абразивных инструментов и режимов шлифования заготовок, что позволит обеспечить требуемые параметры шероховатости поверхностей деталей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кремень З.И., Юрьев В.Г. Технология шлифования в машиностроении. Санкт-Петербург : Политехника. 2007. 424 с.
2. Киселев Е.С., Кольваногов В.Н. Термофизический анализ концентрированных операций шлифования. Ульяновск : УлГТУ. 2002. 139 с.
3. Инженерия поверхности деталей. Под ред. А.Г. Суслова. Москва : Машиностроение. 2008. 320 с.
4. Бишутин С.Г. Качество и износостойкость шлифованных поверхностей деталей автомобилей. Брянск : Десяточка. 2011. 100 с.
5. Бишутин С.Г. Обеспечение требуемой совокупности параметров качества поверхностных слоев деталей при шлифовании. Москва : Машиностроение-1. 2004. 144 с.
6. Суслов. А.Г., Бишутин С.Г. Математическая модель шероховатости шлифованной поверхности. Справочник. Инженерный журнал. 2004. № 8. С. 17-20..
7. Бишутин С. Г. Изменение состояния абразивного инструмента в процессе шлифования. Станки и инструмент. 2004. № 5. С. 27-29.

REFERENCES

1. Kremen ZI, Yuryev VG. Grinding technology in mechanical engineering. St. Petersburg: Polytechnic; 2007.
2. Kiselev ES, Kovalnogov VN. Thermophysical analysis of concentrated grinding operations. Ulyanovsk: UIGTU; 2002.
3. Suslov AG, editor. Surface engineering of parts. Moscow: Mashinostroenie; 2008.
4. Bishutin SG. Quality and wear resistance of ground surfaces of automobile parts. Bryansk: Desyatochka; 2011.
5. Bishutin SG. Ensuring the required consistency of the quality parameters of part surface layers during grinding. Moscow: Mashinostroenie-1; 2004.

6. Suslov AG, Bishutin SG. Mathematical model of the roughness of a polished surface: handbook. Engineering journ. 2004;8:17-20.
7. Bishutin SG. Changing the state of abrasive tools while grinding. STIN. 2004;5:27-29.

Информация об авторах:

Бишутин Сергей Геннадьевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Производство и сервис в транспортном машиностроении» Брянского государственного технического университета, тел. 8-483-256-02-61, Author-ID-РИНЦ: 174978.

Тотай Анатолий Васильевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Техносфера безопасность» Брянского государственного технического университета, тел. 8-910-743-51-85, Author-ID-РИНЦ: 453423.

Bishutin Sergey Gennadyevich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Production and Service in Transport Engineering at Bryansk State Technical University, phone: 8-483-256-02-61, Author-ID-RSCI: 174978.

Totay Anatoly Vasilyevich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Technosphere Safety at Bryansk State Technical University, phone: 8-910-743-51-85, Author-ID-RSCI: 453423.

Федоров Владимир Павлович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология машиностроения» Брянского государственного технического университета, тел. +7-980-315-77-09, Author-ID-РИНЦ: 694695.

Нагоркин Максим Николаевич – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Техносфера безопасность» Брянского государственного технического университета, тел. +7-960-552-61-25, Author-ID-РИНЦ: 391768.

Fedorov Vladimir Pavlovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology at Bryansk State Technical University, phone: +7-980-315-77-09, Author-ID-RSCI: 694695.

Nagorkin Maksim Nikolaevich – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Technosphere Safety at Bryansk State Technical University, phone: +7-960-552-61-25, Author-ID-RSCI: 391768.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.

Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 23.05.2025; одобрена после рецензирования 29.05.2025; принята к публикации 26.06.2025. Рецензент – Соловьев Д.Л. доктор технических наук, профессор Муромского филиала (института) Владимирского государственного университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 23.05.2025; approved after review on 29.05.2025; accepted for publication on 26.06.2025. The reviewer is Solovyov D.L., Doctor of Technical Sciences, Professor of Murom Branch (Institute) of Vladimir State University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.