

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.9

doi 10.30987/2782-5957-2023-9-24-36

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН НА ЭТАПАХ ОБРАБОТКИ И ПРИРАБОТКИ В УСЛОВИЯХ ГРАНИЧНОГО ТРЕНИЯ

Владимир Павлович Федоров¹, Максим Николаевич Нагоркин^{2✉}, Евгений Владиславович Смоленцев³, Елена Владимировна Ковалева⁴

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

³ Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

¹ fedorvlad44@mail.ru, orcid.org/0000-0003-2113-6567

² nagorkin_mn@mail.ru, orcid.org/0000-0002-4536-7522

³ smolentsev.rabota@gmail.com, orcid.org/0000-0002-8747-588X

⁴ lenako1965@mail.ru, orcid.org/0009-0002-4783-462X

Аннотация

Предложен подход, основанный на теории случайных процессов и позволяющий проводить объективный сравнительный анализ результатов формирования профилей шероховатости поверхностей деталей соединений трения скольжения как после технологической обработки, так и в процессе эксплуатационной приработки. Актуальность исследований определяется задачей формирования различными технологическими методами профиля шероховатости поверхностей, который соответствует или близок к эксплуатационному, формирующемуся в процессе приработки деталей соединения трения скольжения, что позволило бы изготавливать изделия, которые начинали бы работу в условиях, близких к нормальному изнашиванию. В исследованиях оценивалось влияние на формирование профилей шероховатости технологических факторов вариаций методов токарной обработки и круглого шлифования с последующим поверхностным пластическим деформированием методами алмазного выглаживания, электромеханической обработкой и др., а также влияние процессов приработки, осуществляемого на испытательном стенде. За критерий идентичности процессов формирования микропрофилей поверхностей деталей принята качественная оценка форм амплитудно-частотных характеристик моделей формирования поверхностей деталей. В статье представлена мето-

дика экспериментальной проверки профиля шероховатости поверхности на стационарность и эргодичность, которую можно использовать для анализа других случайных последовательностей, встречающихся в практике триботехнологических исследований. Построение автокорреляционных функций профиля шероховатости поверхностей до и после приработки позволяет установить влияние технологической наследственности на формирование микропрофиля в процессах обработки поверхностей и приработки деталей. Расчёт показателей оценки теоретических спектральных плотностей профилей шероховатости и построение амплитудно-частотных характеристик процессов формирования шероховатости поверхностей различными технологическими методами и в процессе приработки позволяет выбрать эффективный метод обработки деталей, позволяющий значительно сократить время приработки пар трения-скольжения. Исследования показали, что в качестве финишной обработки деталей следует применять поверхностное пластическое деформирование, позволяющее получить профиль шероховатости поверхностей трения скольжения, близкий к эксплуатационному.

Ключевые слова: приработка, точение, шлифование, деформирование, шероховатость, процессы, стационарность, эргодичность, амплитудно-частотная характеристика.

Ссылка для цитирования:

Федоров В.П. Анализ процессов формирования микропрофиля поверхностей деталей машин на этапах обработки и приработки в условиях граничного трения / В.П. Федоров, М.Н. Нагоркин, Е.В., Смоленцев, Е.В. Ковалева // Транспортное машиностроение. – 2023. - № 09. – С. 24-36. doi: 10.30987/2782-5957-2023-9-24-36.

Original article

Open Access Article

ANALYSIS OF THE MICRO PROFILE FORMATION OF MACHINE ELEMENT SURFACES AT MACHINING STAGES AND RUNNING-IN CONDITIONS OF BOUNDARY FRICTION

Vladimir Pavlovich Fedorov¹, Maksim Nikolaevich Nagorkin^{2✉}, Evgeny Vladislavovich Smolentsev³, Elena Vladimirovna Kovaleva⁴

^{1,2,4} Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

³ Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

¹ fedorvlad44@mail.ru, orcid.org/0000-0003-2113-6567

² nagorkin_mn@mail.ru, orcid.org/0000-0002-4536-7522

³ smolentsev.rabota@gmail.com, orcid.org/0000-0002-8747-588X

⁴ lenako1965@mail.ru, orcid.org/0009-0002-4783-462X

Abstract

An approach is proposed which is based on the theory of random processes and which allows carrying out an objective comparative analysis of the results of forming of surface roughness profiles of sliding friction joint elements both after machining and during operational run-in. The research relevance is determined by the task of forming a surface roughness profile by various technological methods, which corresponds to or is close to the operational one formed during the running-in of the sliding friction joint elements, that would allow manufacturing products which would start operating in conditions close to normal wear. The studies evaluate the influence of technological factors on forming roughness profiles by turning options and round grinding methods followed by surface plastic deformation by diamond smoothing, electromechanical machining, etc., as well as the influence of the run-in processes carried out on the test bench. A qualitative assessment of the forms of amplitude-frequency characteristics of models forming element surfaces is accepted as the identity criterion of processes forming micro-profiles of element surfaces. The paper presents a method of experimental verification of the surface

roughness profile for stationarity and ergodicity, which can be used to analyze other random sequences appearing in the practice of tribotechnological research. The construction of autocorrelation functions of the surface roughness profile before and after running-in makes it possible to find out the influence of technological heredity on forming a microprofile while surface machining and running-in of parts. The calculation of indicators to evaluate the theoretical spectral densities of roughness profiles and the construction of amplitude-frequency characteristics of forming surface roughness by various technological methods and during run-in allows choosing an effective method of machining parts, which significantly reduces the run-in time of sliding friction pairs. Studies have shown that surface plastic deformation should be used as the finishing treatment of parts, which allows to obtain a roughness profile of sliding friction surfaces close to the operational one.

Keywords: running-in, turning, grinding, deformation, roughness, processes, stationarity, ergodicity, amplitude-frequency characteristics.

Reference for citing:

Fedorov VP, Nagorkin MN, Smolentsev EV, Kovaleva EV. Analysis of the micro profile formation of machine element surfaces at machining stages and running-in conditions of boundary friction *Transport Engineering*. 2023;9:24-36. doi: 10.30987/2782-5957-2023-9-24-36.

Введение

Результаты множества исследований в области трения и износа деталей машин показывают, что в процессе приработки на поверхностях трения скольжения деталей формируются эксплуатационные параметры физико-механических свойств поверхностного слоя и шероховатости, которые отличаются количественно и качественно от параметров качества вначале приработки. Значения эксплуатационных параметров качества поверхностного слоя также называю «приработочными» или «оптимальными».

Известно, что параметры физико-

механических свойств и шероховатости поверхностного слоя являются факторами, во многом определяющими эксплуатационные свойства соединений (износостойкость, контактную жёсткость и др.). В связи с этим, очевидно, что знание закономерностей формирования эксплуатационных параметров качества поверхностей в процессе приработки соединений (в частности, шероховатости) позволило бы непосредственно в процессе изготовления деталей машин формировать шероховатость поверхностей деталей, близкую к эксплуатационной. В настоящее время имеется от-

носителем небольшое число исследований, в которых осуществляется количественная оценка влияния технологических факторов различных методов обработки

Актуальность решаемой задачи

В работах отечественных и зарубежных учёных доказано, что при механической обработке деталей величина и форма микронеровностей поверхностей по внешним геометрическим признакам определяются видом и режимами обработки, а также обрабатываемостью материала заготовки с учётом технологической наследственности [1-4]. После завершения обработки формируются так называемые технологические параметры качества поверхностного слоя детали, которые можно представить, как множество $R_{\text{ТПК}}$

$$R_{\text{ТПК}} \in (r_{\text{ШТ}}; r_{\text{ВТ}}; r_{\text{МТ}}; r_{\text{НЦТ}}; r_{\text{СТ}}). \quad (1)$$

Элементами множества $R_{\text{ТПК}}$ являются множества технологических параметров различных групп качества поверхности и поверхностного слоя:

– $r_{\text{ШТ}}$ – технологические параметры шероховатости: Ra_{T} , $Rmax_{\text{T}}$, Rp_{T} , b_{T} , v_{T} , b_{T} и др.;

– $r_{\text{ВТ}}$ – технологические параметры волнистости: Wa_{T} , $Wmax_{\text{T}}$, Wp_{T} и др.;

– $r_{\text{МТ}}$ – технологические параметры макроотклонений: EFK_{T} – отклонение от круглости; $EFKa_{\text{T}}$ – среднее арифметическое отклонение от круглости; $EFKq_{\text{T}}$ – среднее квадратическое отклонение от круглости и др.;

– $r_{\text{НЦТ}}$ – технологические параметры наклёпа: $H_{\text{ц0}}$ – поверхностную микротвёрдость; $h_{\text{н}}$, $U_{\text{н}}$ – глубина и степень наклёпа поверхностного слоя и др.;

– $r_{\text{СТ}}$ – параметры остаточных напряжений: $\sigma'_{\text{ост}}$, $\sigma''_{\text{ост}}$ – поверхностные остаточные макронапряжения первого и второго рода, h_{σ} – глубина залегания остаточных напряжений и др.

Трансформация параметров качества из технологических $R_{\text{ТПК}}$ в эксплуатационные $R_{\text{ЭПК}}$ происходит в процессе эксплуатации (приработки) соединения. В частности, для соединений трения скольжения такая трансформация определяется свойствами контактирующих материалов и условиями эксплуатации (скоростями от-

деталей машин на формирование требуемых эксплуатационных параметров качества поверхностного слоя.

носителем скольжения поверхностей, нагрузками по величине и виду (статические или динамические), видами смазки, температурой и др.). Элементы множества $R_{\text{ЭПК}}$ аналогичны элементам множества $R_{\text{ТПК}}$ и помечаются, как и принадлежащие им параметры качества, индексом «Э» – эксплуатационные.

Таким образом, при завершении процесса приработки формируется множество $R_{\text{ТПЭ}}$ эксплуатационных параметров качества

$$R_{\text{ЭПК}} \in (r_{\text{ШЭ}}; r_{\text{ВЭ}}; r_{\text{МЭ}}; r_{\text{НЦЭ}}; r_{\text{СЭ}}). \quad (2)$$

На рис. 1 представлена функциональная кривая, характеризующая общую закономерность интенсивности износа I поверхностей деталей соединений трения скольжения. На ней выделены зоны приработки ($0 - a$) и нормальной эксплуатации ($a - b$). Формирование эксплуатационных параметров качества поверхностного слоя, и в частности, шероховатости происходит во время приработки соединения на участке ($0 - a$), так как интенсивность износа I после точки a постоянна ($I = dh/dt = \text{const}$). На этом участке под воздействием сложных физико-химических процессов, характерных для приработки пар трения скольжения, формируются эксплуатационные значения показателей физико-механических свойств и параметров шероховатости контактирующих поверхностей деталей. При этом, время приработки $t_{\text{п}}$ и величина начального износа $h_{\text{н}}$ при прочих равных условиях зависят от значений технологических параметров качества в начале процесса приработки (рис. 1).

При обеспечении в процессе обработки деталей значений параметров качества контактирующих поверхностей, в том числе и микропрофиля, близких к эксплуатационным ($R_{\text{ТПК}} \approx R_{\text{ЭПК}}$), формирующимся, обычно, в конце приработки, кривая интенсивности износа I располагалась бы в координатных осях ($h_1 - O_1 - t_1$), а процесс приработки удалось бы сократить на время

$t = t_n - t_{1n}$. Величина начального износа в этом случае составила бы h_{1n} , а время приработки – t_{1n} .

Уменьшение значений h_n и t_n положительно сказывается на точности и долговечности работы сопряжения в процессе нормальной эксплуатации. В идеальном случае при обеспечении эксплуатационных параметров качества поверхностного слоя (рис. 1) в процессе изготовления де-

талей удалось бы избежать процесса приработки, и работа соединения сразу началась бы в зоне нормального изнашивания, т. е. в координатных осях ($h_2 - O_2 - t_2$) при нулевых значениях начального износа и времени приработки. Таким образом, исследование процессов формирования шероховатости поверхностей деталей как в процессе приработки, так и в процессе обработки, является актуальной задачей.

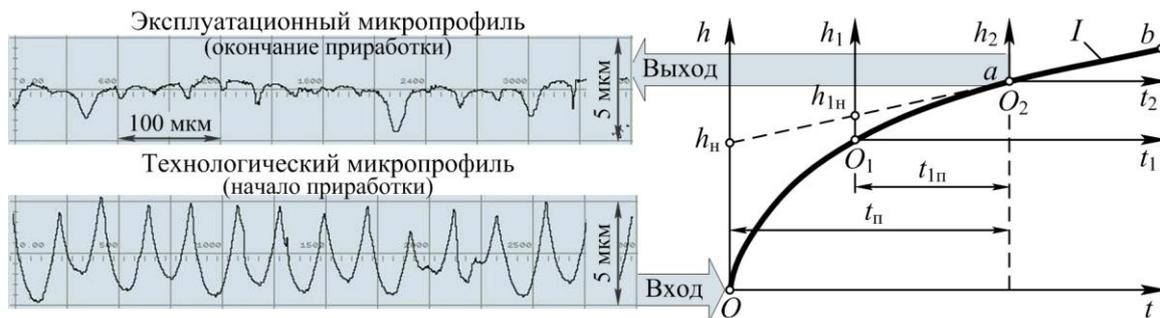


Рис. 1. Закономерность интенсивности износа I поверхностей деталей соединений трения скольжения и профилограммы шероховатости технологического и эксплуатационного микропрофиля поверхности
 Fig. 1. The regularity of wear intensity I of the surfaces of parts of sliding friction joints and profilograms of the roughness of the technological and operational microprofile of the surface

Методика проведения экспериментов

Проводились экспериментальные исследования для оценки влияния методов обработки и их комбинаций, а также последующей приработки деталей на формирование эксплуатационных параметров качества поверхностного слоя. Для чистовой обработки поверхностей образцов использовались лезвийное точение (обеспечивались параметры шероховатости поверхности $Ra = 6,0$ мкм и $Ra = 1,8$ мкм) и круглое шлифование (обеспечивались параметры шероховатости $Ra = 1,45$ мкм и $Ra = 0,35$ мкм) (рис. 2а, б).

Диапазоны шероховатости выбирались как из технико-экономических соображений, так и с учётом дальнейшей обработки, снижающей значения шероховатости, например, методами поверхностного пластического деформирования (ППД), методами лазерной обработки, методами обработки с модификацией поверхности антифрикционными мягкими приработочными плёнками или износостойкими твёрдыми (нанесение твёрдых нитрид содержащих покрытий с их дальнейшей финиш-

ной обработкой) материалами и др. Такие значения шероховатости рассматривались как характеристики предварительной обработки точением и шлифованием, а при стендовых испытаниях образцов на износ – как исходная шероховатость поверхности трибоэлемента (для пути трения $L = 0$) (рис. 2а, б).

Стендовые испытания проводились по схеме «образец-колодка» на машине трения МИ-1М (рис. 2в) при следующих условиях: скорость относительного скольжения поверхностей образцов $V = 0,9$ м/сек ($V_{max} = 2,5$ м/сек), давление $P = 100$ Н/см², смазка – масло «Индустриальное 12». Эти условия обеспечивают полужидкостное трение, при котором большая часть поверхности разделена смазкой, но отдельные элементы поверхностей соприкасаются. В таких условиях работает большинство подшипников скольжения. Образцы изготавливались из стали 45 в состоянии поставки, а колодки – из чугуна АЧС-1. Величина износа измерялась на профилографе-профилометре [5] методом есте-

ственных баз через (2, 6, 10, 14, 18)·10³ м пути трения поверхности образца.

Идентичные образцы обрабатывались алмазным выглаживанием (рис. 2г) с различной силой Q выглаживания. Фрагменты сформированных профилей поверхностей после приработки и обработки выглаживанием показаны на рис. 2д и 2е.

Анализ полученных результатов убе-

дительно показывает сходство получаемых профилей поверхностей в обоих случаях, хотя происходящие физико-химические процессы при формировании поверхностей различны. В частности, обнаружено значительное сходство статистических характеристик распределения ординат рассматриваемых профилей по высоте, а также их относительных опорных площадей.

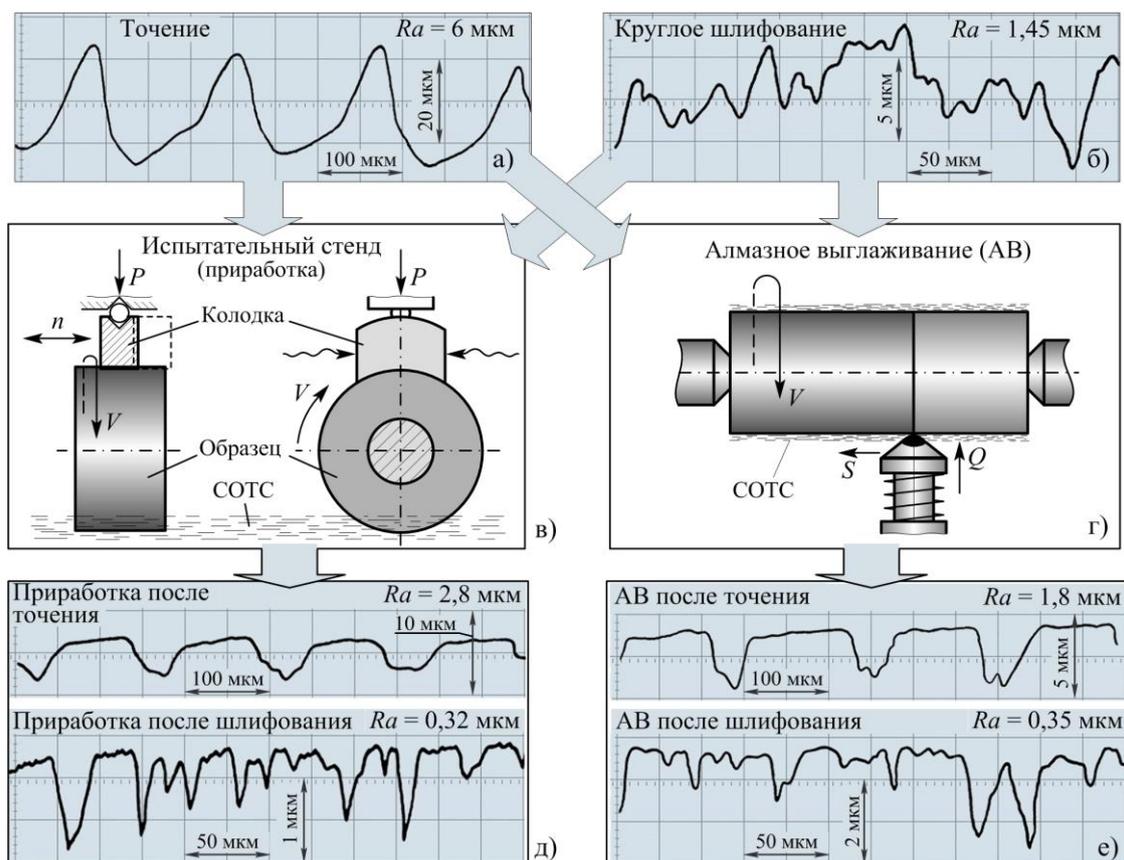


Рис. 2. Схема и результаты эксперимента по исследованию формирования микропрофиля поверхностей в процессе приработки и после алмазного выглаживания
 Fig. 2. Scheme and results of an experiment to research the formation of a microprofile of surfaces during running-in and after diamond burnishing

Методика обработки результатов экспериментов

При исследовании трансформации профиля шероховатости поверхностей деталей обработкой методами ППД сведения о механизме явления недостаточны и носят, в основном, качественный или статистический характер (это относится и к процессу приработки). Поэтому задача в данном случае состоит в получении с помощью теоретико-вероятностных методов сведений об этом механизме, которые могут дать практически приемлемые рекомендации по обработке деталей соединений трения сколь-

жения с целью минимизации времени приработки.

В настоящее время развивается направление вероятностного рассмотрения различных параметров неровностей поверхности на уровне случайных функций с использованием корреляционной теории, спектральной теории, теории выбросов и др. [6-8]. Для успешного решения этих задач удобно представлять профили шероховатости поверхностей в виде эргодических стационарных случайных процессов.

Экспериментально стационарность и эргодичность профиля шероховатости поверхностей удобно исследовать с помощью критерия серий и автокорреляционных функций соответственно [6-8].

В последовательности из N измеряемых значений случайной величины x (например, параметр шероховатости), каждое значение относят к одной из взаимоисключающих категорий, обозначаемых знаками минус или плюс. Например, если получена последовательность измеренных величин параметра Rq_i с медианой $Me(Rq)$, то значения Rq_i , удовлетворяющие неравенству $Rq_i \geq Me(Rq)$, относят к категории плюс (+), а не удовлетворяющие ему – к категории минус (-).

При исследовании стационарности

профиля шероховатости поверхности образца из стали 45 после обработки круглым шлифованием и последующего алмазного выглаживания (АВ) с полученной поверхности записывалась профилограмма протяженностью 16 базовых длин (число выбирается произвольно, но не менее 10) по 0,8 мм в соответствии с ГОСТ 2789-73. Фрагмент профилограммы шероховатости представлен на рис. 3.

Далее по результатам компьютерной обработки формировались массивы параметров шероховатости R_j и определялись их медианы $Me(R_j)$. По результатам расчётов строятся вариационные ряды в виде графиков с указанием медианы ряда (рис. 3) для среднего квадратического отклонения профиля Rq .

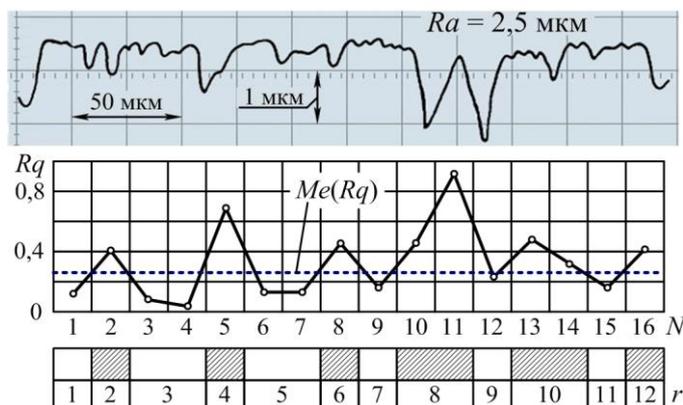


Рис. 3. Определение стационарности профиля шероховатости поверхности по параметру Rq

Fig. 3. Determination of stationarity of the surface roughness profile by the parameter Rq

На графиках выделяются серии, представляющие собой последовательности измеренных значений параметра в вариационном ряду, отличающиеся знаком (+) или (-) от рядом находящихся (-) или (+). На рис. 3 в последовательности из $N = 16$ измерений параметров шероховатости выделены $r = 12$ серий. Число r позволяет определить, являются ли измеренные параметры независимыми случайными оценками одной и той же случайной величины.

Если N представляет собой последовательность независимых оценок одной и той же случайной величины, то число r является случайной величиной с математическим ожиданием $M(r)$ и дисперсией

$S^2(r)$ [6]

$$M(r) = \frac{2N_1N_2}{N} + 1, \quad (3)$$

$$S^2(r) = \frac{2N_1N_2(N_1N_2 - N)}{N^2(N - 1)}. \quad (4)$$

Здесь N_1, N_2 – число измерений, соответственно со знаком (+) и (-).

При $N_1 = N_2 = 0,5N$ зависимости (3) и (4) принимают вид:

$$M(r) = 0,5N + 1, \quad (5)$$

$$S^2(r) = \frac{N(N - 2)}{4(N - 1)}. \quad (6)$$

Область принятия гипотезы о независимости наблюдаемых значений исследуе-

мого параметра шероховатости определяется интервалом [6]

$$r_{n;1-\alpha/2} < r \leq r_{n;\alpha/2}, \quad (7)$$

где $n = 0,5N$, а $r_{n;1-\alpha/2} = r_{\min}$, $r_{n;\alpha/2} = r_{\max}$ – табличные допустимые значения нижней и верхней границ числа серий r при уровне значимости α .

Для данных, представленных на рис. 2, определяем [6]

$$r_{n;1-\alpha/2} = r_{8;0,975} = 6; r_{n;\alpha/2} = r_{8;0,025} = 13.$$

Так как значение $r = 12$ входит в интервал между 6 и 13, гипотеза принимает-

ся. Это значит, что нет доказательств присутствия тренда и рассматриваемый профиль шероховатости поверхности является стационарным по параметру Rq с доверительной вероятностью $\alpha = 0,05$.

Аналогичные исследования при таких же условиях проводились для других высотных параметров шероховатости (Ra , Rp , Rz , $Rmax$), параметров параболической аппроксимации опорной кривой b и v (табл.) [1].

Таблица

Результаты исследований стационарности профиля шероховатости поверхностей по параметрам Ra , Rp , Rz , $Rmax$, b , v при различных методах обработки

Table

Results of studying the stationarity of the surface roughness profile according to Ra , Rp , Rz , $Rmax$, b , v parameters using various machining methods

	Методы обработки											
	Точение $Ra = 6,2$ мкм			Точение + ППД $Ra = 0,8$ мкм			Круглое шлифование $Ra = 0,8$ мкм			Кругл. шлиф. + ППД $Ra = 0,2$ мкм		
	N_1	N_2	r	N_1	N_2	r	N_1	N_2	r	N_1	N_2	r
Ra	6	6	12	5	5	10	5	5	10	4	4	8
Rp	6	5	11	4	3	7	5	4	9	4	4	8
Rz	4	4	8	4	4	8	5	5	10	5	5	10
$Rmax$	4	4	8	4	4	8	5	5	10	5	6	11
b	4	4	8	5	4	9	5	6	11	5	4	9
v	4	3	7	5	4	9	5	5	10	4	4	8

Результаты показывают, что для всех рассматриваемых параметров шероховатости профиль поверхности является стационарным с доверительной вероятностью $\alpha = 0,05$ для всех исследуемых методов обработки, так как количество серий r для параметров не выходит за пределы допустимого интервала.

Об эргодичности стационарного профиля поверхности можно судить по виду его автокорреляционной функции.

Необходимым и достаточным условием эргодичности стационарного процесса является стремление к нулю автокорреляционной функции профиля шероховатости поверхности при времени запаздывания стремящемся к бесконечности. Её оценка C_{xx} , учитывающая рассмотрение профиля шероховатости в системе XOY в соответствии с [7, 8] имеет вид:

$$C_{xx}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-\tau} y_i y_{i+\tau} \quad (8)$$

Здесь N – число последовательных ординат дискретизированной профилограммы поверхности, снятой для расчета автокорреляционной функции; y_i – i -тая ордината профиля шероховатости поверхности, считанная с профилограммы; $y_{i+\tau}$ – $(i+\tau)$ -тая ордината, взятая относительно ординаты y_i через интервал запаздывания $\tau = K\Delta$, где Δ – шаг дискретизации.

Величина K выбирается при условии: $K_{max} \leq N/4$ [7].

Таким образом, $K = 0, 1, 2, \dots, N/4$. Для расчета автокорреляционных функций длина исследуемых реализаций составляла для поверхностей, обработанных точением с последующим алмазным выглаживанием – 8000 мкм, а для поверхностей, обработанных круглым шлифованием последую-

щим АВ – 4000 мкм. Шаг дискретизации микропрофиля составлял в первом случае 5 мкм, а во втором – 2,5 мкм. Профилограммы исследуемых микропрофилей и их автокорреляционные функции показаны на рис. 4.

Анализ позволяет отметить, что с возрастанием интервала задержки τ автокорреляционные функции затухают и стремятся к нулю, причем в случае рис. 4б автокорреляционная функция напоминает дельта-функцию. Следовательно, времен-

ные модели соответствующих профилей поверхностей приближаются к моделям типа «белый шум», что очень важно при применении корреляционной и спектральной теорий стационарных случайных процессов в исследовании формирования микропрофилей поверхностей. Аналогичные результаты получены при анализе микропрофилей поверхностей после точения, круглого шлифования и в процессе приработки.

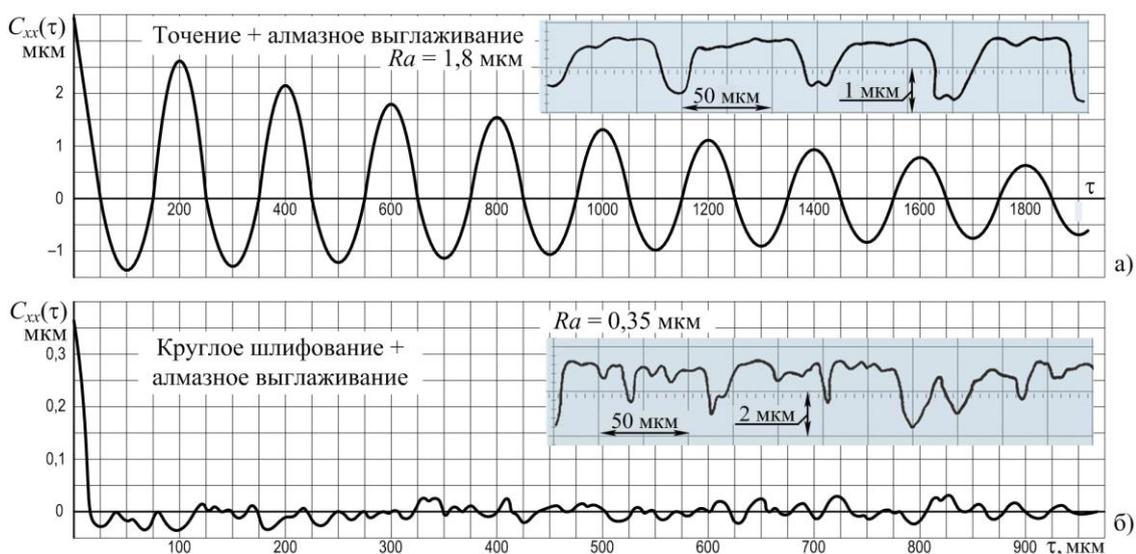


Рис. 4. Автокорреляционные функции профилей шероховатости поверхностей деталей после: а – точения и алмазного выглаживания; б – круглого шлифования и алмазного выглаживания
 Fig. 4. Autocorrelation functions of surface roughness profiles after: a – turning and diamond burnishing; b – cylindrical grinding and diamond burnishing

Итак, результаты исследований показали, что профили шероховатостей поверхностей деталей, полученных после типовых методов лезвийной, абразивной и последующей отделочно-упрочняющей обработки и процесса приработки, являются стационарными и эргодическими случайными процессами, что делает правомочным применение для их анализа аппарата стационарных случайных функций.

Следует отметить, что сравнение автокорреляционных функций профиля шероховатости исходной поверхности (до обработки) с автокорреляционными функциями профилей шероховатости поверхностей после обработки позволяет установить в этих случаях влияние технологической наследственности на шаговые параметры шероховатости в процессах обра-

ботки и приработки. В применении к профилю шероховатости его стационарность означает, что поверхность формируется в результате устойчивого процесса обработки, либо стабильных условий трения и изнашивания.

Эргодичность микропрофиля шероховатости означает, что статистические характеристики всех возможных профилей поверхности, снятых в одном и том же направлении, одинаковы, и по одному профилю достаточно большой длины можно определять статистические параметры с той же достоверностью, как и по множеству профилей меньшей длины.

Полученные результаты позволяют подойти к моделированию формирования микропрофиля при приработке соединений и ППД поверхностей деталей с позиций

спектральной теории стационарных случайных процессов. В соответствии с теорией случайных процессов принимается гипотеза преобразования исходного микропрофиля поверхности в конечный в результате его прохождения через гипотетическую стационарную линейную систему. В такой системе связь спектральных плотностей входного и выходного сигналов определяется зависимостью [6-8]

$$S_y(\omega) = |\Phi(j\omega)|^2 S_x(\omega), \quad (9)$$

где $S_y(\omega)$ – спектральная плотность на частоте ω профиля шероховатости, сформированного после обработки детали (выход системы); $S_x(\omega)$ – спектральная плотность на частоте ω профиля шероховатости поверхности до обработки детали (вход системы); $\Phi(j\omega)$ – амплитудно-фазовая характеристика системы, описывающей процесс воздействия на обрабатываемую поверхность.

Модуль амплитудно-фазовой характеристики является амплитудно-частотной характеристикой $K(\omega)$ (АЧХ) системы, показывающая зависимость коэффициента усиления системы от частоты сигнала [6-8]

$$|\Phi(j\omega)| = K(\omega) = \frac{A_{вых}(\omega)}{A_{вх}(\omega)}, \quad (10)$$

где $A_{вых}$ и $A_{вх}$ – амплитуды выходного и входного профилей на частоте ω .

Тогда:

$$S_y(\omega) = K^2(\omega) S_x(\omega), \quad (11)$$

Из (11) следует, что АЧХ исследуемой системы:

$$K(\omega) = \sqrt{\frac{S_y(\omega)}{S_x(\omega)}}. \quad (12)$$

Выражения (11), (12) характеризуют удобство спектрального метода исследо-

$$\bar{C}_{xx}(i) = 2\Delta \left[C_{xx}(0) + 2 \sum_{k=1}^{L-1} C_{xx}(K) \omega_T \cos \frac{\pi K i}{F} \right]. \quad (14)$$

Здесь $0 \leq i \leq F$, $F = (2 \dots 3)L$, где L – точка отсечения корреляционного окна; Δ – шаг квантования профиля шероховатости; ω_T – корреляционное окно (окно

вания профилей шероховатости поверхностей деталей машин, в частности, исследования их трансформации в процессах приработки, ППД или других случайных процессов, являющихся стационарными и эргодичными.

Знание АЧХ процессов формирования профиля шероховатости поверхности при обработке методами ППД и в процессе приработки дает возможность выбрать эффективный метод окончательной обработки и сократить время приработки пар трения-скольжения [1].

Задача определения спектральных характеристик профиля шероховатости возникает, например, при оптимизации процессов обработки с целью создания микрорельефа поверхности, близкого к эксплуатационному. Критерием оптимальности выбора управляющих факторов процесса обработки ППД может служить величина [7, 8]

$$\xi = \sum_{\omega} |K_1(\omega_i) - K_2(\omega_i)| = \min, \quad 0 \leq \omega \leq \infty. \quad (13)$$

Здесь $K_1(\omega_i)$ и $K_2(\omega_i)$ – значения АЧХ моделируемых систем процессов формирования параметров шероховатости при обработке ППД и в ходе приработки пары трения, соответственно, на частоте ω_i . Значения $K_1(\omega_i)$ и $K_2(\omega_i)$ определяются в соответствии с выражением (12), в которое входят теоретические спектральные плотности $S_x(\omega)$ и $S_y(\omega)$, однако при практических расчётах следует использовать их оценки, которые в соответствии с рекомендациями [6] рассчитываются на основе соответствующих значений автокорреляционных функций (8) по формуле (14):

Тьюки [7]); $C_{xx}(0)$ и $C_{xx}(K)$ – значения автокорреляционной функции при запаздываниях $\tau = 0$; $\tau = K$.

рования параметров шероховатости поверхностей деталей.

Как и в предыдущем случае для

Оценка результатов исследований

Рассмотрим результаты построения автокорреляционных функций и АЧХ для систем, моделирующих процессы форми-

предварительной обработки поверхностей образцов применялись точение (обеспечивались параметры $Ra = 6,0$ мкм и $Ra = 1,8$ мкм) и круглое шлифование (обеспечивались параметры $Ra = 1,45$ мкм и $Ra = 0,35$ мкм).

Приработка образцов осуществлялась на машине трения МИ-1М по указанной ранее методике.

В качестве метода ППД применялся метод электромеханической обработки (ЭМО) поверхностей подвижным индентором (ролик из стали Х12М (HRC₃ = 58...60) с каплевидным контактом), установленным в инструменте упругого действия [1, 9]. Через пятно контакта индентора с обрабатываемой поверхностью пропускался постоянный ток силой до 500 А [1, 9]. Постоянными во всех случаях поддерживались следующие режимы ЭМО: скорость обработки $V = 40$ м/мин; подача $S = 0,07$ мм/об; число проходов $i = 1$. Следует иметь в виду, что при низкой силе тока (менее 100...150 мА) процесс ЭМО вырождается в процесс обычного накатывания, так как тепловое воздействие на физико-механические свойства обрабатываемой

поверхности оказывается незначительным. В связи с этим, сила накатывания Q варьировалась на двух уровнях: $Q = 400$ Н и $Q = 800$ Н, что обусловлено сильным парным взаимодействием между этими двумя факторами.

При исследовании профилограмм поверхностей образцов длина реализаций профилей шероховатости составляла: при предварительной обработке точением – 4000 мкм; при предварительной обработке круглым шлифованием – 2000 мкм. Шаг дискретизации профиля Δ в первом случае составлял 5 мкм, во втором – 2,5 мкм.

Анализ изменения автокорреляционных функций профиля шероховатости в процессе изнашивания поверхностей деталей, обработанных точением ($Ra = 1,8$ мкм), показывает, что период автокорреляционных функций не меняется с увеличением пути трения L (рис. 5). Это значит, что в данном случае эксплуатационный микропрофиль поверхности наследует средний шаг микронеровностей после исходной обработки.

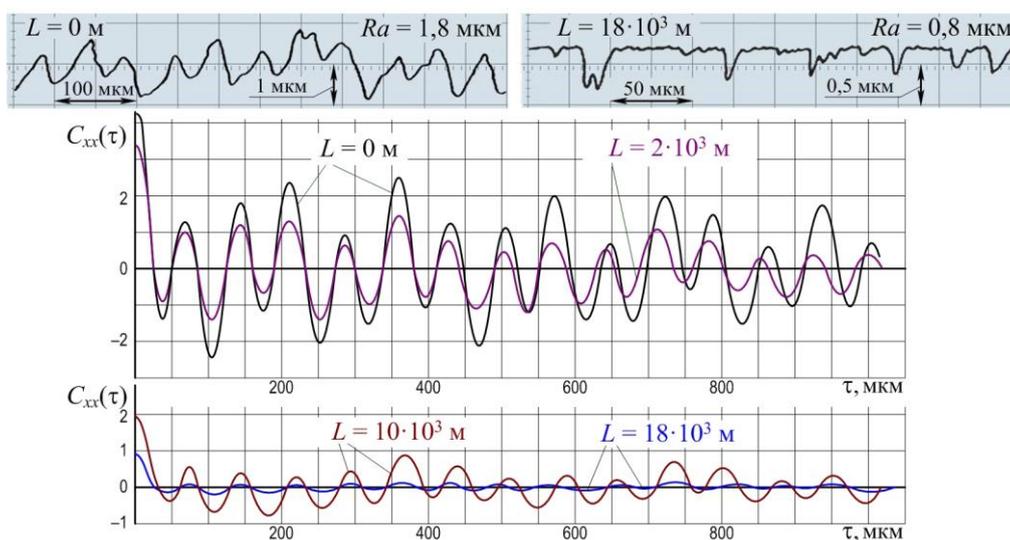


Рис. 5. Изменение автокорреляционных функций профилей шероховатости поверхности детали в процессе приработки пары трения скольжения в зависимости от пути трения L (метод обработки – точение и последующая электромеханическая обработка)

Fig. 5. Changing the autocorrelation functions of the surface roughness profiles of the part in the process running-in of a sliding friction pair depending on the friction path L (processing method – turning and subsequent electromechanical processing)

По полученным оценкам автокорреляционных функций в соответствии с (14) рассчитывались оценки теоретических

спектральных плотностей профилей шероховатости $\bar{C}_{xx}(i)$ и $\bar{C}_{yy}(i)$. Их анализ пока-

зывает, что спектральная плотность профиля шероховатости поверхностей с исходной обработкой точением ($Ra = 6,0$ мкм) отличается наличием ярко выраженного острого пика, соответствующего периоду $T \approx 200$ мкм, а это значит, что наиболее весомый вклад в дисперсию профиля вносят неровности с шагом исходной шероховатости, имеющей примерно такой же период. На более высоких частотах оценки $S_{xx}(i)$ имеют незначительные колебания в ту или иную сторону в пределах доверительного интервала, которые могут иметь чисто случайный характер.

Сглаженные АЧХ моделей формирования профиля шероховатости поверхностей в процессе приработки и после ППД методом ЭМО (рис. 6) показывают, что в

процессе приработки наиболее интенсивно уменьшаются микронеровности профиля с периодами $T \approx 70 \dots 200$ мкм, т.е., преобладающие неровности исходного профиля шероховатости. Между АЧХ моделей рассматриваемых процессов наблюдается определенное соответствие (в форме графиков). Кроме того, установлено, что при изменении режимов ЭМО возможно их сближение, что можно проследить на представленных графиках. Полное совпадение АЧХ было бы идеальным случаем. Это объясняется зависимостью степени сглаживания выступов профиля шероховатости от интенсификации процесса ППД.

Аналогичные результаты имеют место во всех других рассматриваемых случаях.

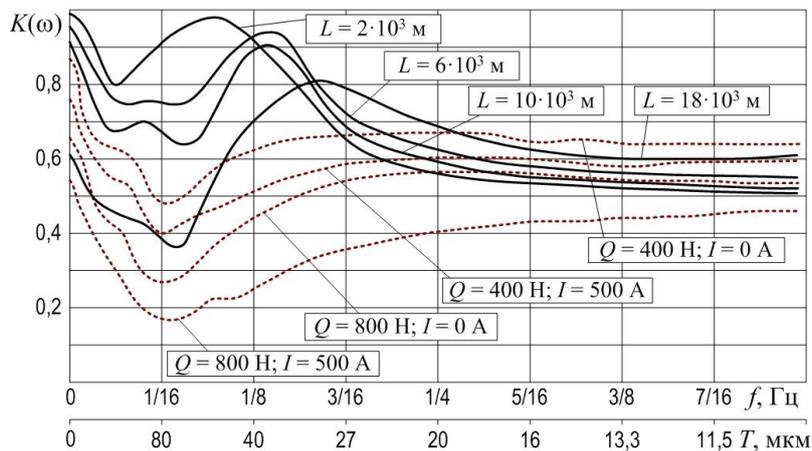


Рис. 6. Амплитудно-частотные характеристики моделей формирования профиля шероховатости поверхностей деталей в процессе приработки и после электромеханической обработки (ЭМО): сплошные линии – процесс приработки; пунктирные – ЭМО

Fig. 6. Amplitude-frequency characteristics of the models for the formation of the surface roughness profile of parts during running-in and after surface plastic deformation by electromechanical processing (EMP): solid lines – running-in process; dotted lines – EMP

Заключение

На основе полученных результатов установлено, что на финишных операциях обработки поверхностей деталей соединения трения скольжения после предварительного точения и круглого шлифования следует применять обработку ППД (если это технически осуществимо), которая, позволяет получить профиль шероховатости поверхностей, близкий к эксплуатационному. Это значительно уменьшает период приработки соединений и величину начального износа, обеспечивая тем самым

повышенную надёжность работы соединения. Кроме того, методы ППД обладают повышенной технологической гибкостью и легко адаптируются к использованию в компьютерных системах обработки при управлении качеством поверхности в пределах перехода [10].

Предложенные подходы к оценке стационарности и эргодичности профилей шероховатости, расчету и построению их автокорреляционных функций и показателей оценки теоретических спектральных

плотностей, построению амплитудно-частотных характеристик процессов формирования микропрофилей поверхностей позволяют проводить объективный сравнительный анализ результатов формирования профилей шероховатости поверхностей деталей, что, в свою очередь, позво-

лит уменьшить технико-экономические затраты при выборе технологий серийного изготовления изделий, работающих в условиях воздействия эксплуатационных нагрузок, в том числе в условиях трения скольжения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Фундаментальные основы технологического обеспечения и повышения надежности изделий машиностроения : монография / А. Г. Суслов, В. П. Федоров, О. А. Горленко [и др.]. Москва : Инновац. машиностроение, 2022. 552 с.
2. Инженерия поверхности деталей / А. Г. Суслов, В. Ф. Безязычный, Ю. В. Панфилов, С. Г. Бишутин [и др.]. Москва : Машиностроение, 2008. 320 с.
3. Рыжов Э. В., Суслов А. Г., Фёдоров В. П. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин. Москва : Машиностроение, 1979. 174 с.
4. Бутенко В. И. Научные основы функциональной инженерии поверхностного слоя деталей машин. Ростов-на-Дону : Издат. центр ДГТУ. 2017. 481 с.
5. Суслов, А.Г., Федоров В.П., Нагоркин М.Н., Пыриков И.Л. Комплексный подход к экспериментальным исследованиям технологических систем металлообработки по обеспечению параметров качества и эксплуатационных свойств поверхностей деталей машин. Научные технологии в машиностроении. 2018. № 10. С. 3-13.

- DOI: 10.30987/issue_5bb4b1f952b923.31755344.
6. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов: Москва : Мир, 1974. 464 с.
7. Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения. Вып. 1 / Пер. с англ. В. Ф. Писаренко: Москва : Мир, 1971. 316 с.
8. Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения. Вып. 2 / Пер. с англ. В. Ф. Писаренко: Москва : Мир, 1972. 287 с.
9. Суслов, А. Г., Федоров В.П., Нагоркин М.Н. Технологическое обеспечение физико-механических свойств поверхностного слоя деталей финишной электромеханической обработкой. Научные технологии в машиностроении. 2020. № 12. С. 22-30. – DOI: 10.30987/2223-4608-2020-12-22-30.
10. Нагоркин М. Н., Федоров В. П., Тотай А. В., Ковалева Е. В. Управление формированием параметров качества поверхности детали в процессе обработки поверхностным пластическим деформированием. Вестник Брянского государственного технического университета. 2017. № 8. С. 4-13. DOI: 10.12737/article_5a3779fb6455f6.47680401.

REFERENCES

1. Suslov AG, Fedorov VP, Gorlenko OA. Fundamental principles of technological support and reliability improvement of machine-building products: monograph. Moscow: Innovatsionnoe Mashinostroenie; 2022.
2. Suslov AG, Bezyazichny VF, Panfilov YuV, Bishutin SG. Engineering of the surface of parts. Moscow: Mashinostroenie; 2008.
3. Ryzhov EV, Suslov AG, Fedorov VP. Technological support of operational properties of machine parts. Moscow: Mashinostroenie; 1979.
4. Butenko VI. Scientific foundations of functional engineering of the surface layer of machine parts. Rostov-on-Don: DSTU publishing centre; 2017.
5. Suslov AG, Fedorov VP, Nagorkin MN, Pyrikov IL. Complex approach to experimental investigations of metal-working technological systems to ensure parameters of quality and operational properties of machinery surfaces. Science Intensive Technolo-

- gies in Mechanical Engineering. 2018;10:3-13. DOI: 10.30987/issue_5bb4b1f952b923.31755344.
6. Bendat J, Pearsol A. Measurement and analysis of random processes. Moscow: Mir; 1974.
7. Jenkins G, Watts D. Spectral analysis and its applications: issue 1. Moscow: Mir; 1971.
8. Jenkins G., Watts D. Spectral analysis and its applications: issue 2. Moscow: Mir; 1972.
9. Suslov AG, Fedorov VP, Nagorkin MN. Technological support of physical-mechanical properties of the surface layer of parts at electro-mechanical finishing Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering. 2020;12:22-30. DOI: 10.30987/2223-4608-2020-12-22-30.
10. Nagorkin MN, Fedorov VP, Totai AV, Kovaleva EV. Control of part surface parameter quality during processing with surface plastic deformation. Bulletin of Bryansk State Technical University. 2017;8:4-13. DOI: 10.12737/article_5a3779fb6455f6.47680401.

Информация об авторах:

Федоров Владимир Павлович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология машиностроения» Брянского государственного технического университета, тел. +7-980-315-77-09, e-mail: fedorvlad44@mail.ru; Author-ID-РИНЦ: 694695.

Нагоркин Максим Николаевич – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Техносферная безопасность» Брянского государственного технического университета, тел. +7-960-552-61-25, e-mail: nagorkin@tu-bryansk.ru; Author-ID-РИНЦ: 391768.

Fedorov Vladimir Pavlovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology at Bryansk State Technical University, phone: 8-980-315-77-09, e-mail: fedorvlad44@mail.ru; 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: 8-960-552-61-25, e-mail: nagorkin@tu-bryansk.ru; Author-ID- RSCI: 391768.

Смоленцев Евгений Владиславович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология машиностроения» Воронежского государственного технического университета, тел. +7-910-746-40-75, e-mail: smolentsev.rabota@gmail.com; Author-ID-РИНЦ: 438790.

Ковалева Елена Владимировна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Триботехническое материаловедение и технологии материалов» Брянского государственного технического университета, тел. +7-906-502-45-29, e-mail: lenako1965@mail.ru; Author-ID-РИНЦ: 719844.

Smolentsev Evgeny Vladislavovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology at Voronezh State Technical University, phone: +7-910-746-40-75, e-mail: smolentsev.rabota@gmail.com; Author-ID- RSCI: 438790.

Kovaleva Elena Vladimirovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Tribotechnical Materials Science and Materials Technology at Bryansk State Technical University, phone: +7-906-502-45-29, e-mail: lenako1965@mail.ru; Author-ID- RSCI: 719844.

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 17.07.2023; одобрена после рецензирования 18.08.2023; принята к публикации 28.08.2023. Рецензент – Хандожко А.В., доктор технических наук, профессор кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» Брянского государственного технического университета, главный редактор журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 17.07.2023; approved after review on 18.08.2023; accepted for publication on 28.08.2023. The reviewer is Khandozhko A.V., Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Metal Cutting Machines and Tools at Bryansk State Technical University, Editor-in-Chief of the journal *Transport Engineering*.