

Научная статья

УДК 621.9

doi: 10.30987/2223-4608-2023-37-45

## Технологическое управление параметрами эксплуатационной шероховатости поверхностей деталей пар трения скольжения комбинированной антифрикционной обработкой

Максим Николаевич Нагоркин<sup>1</sup>, д.т.н.

Владимир Павлович Федоров<sup>2</sup>, д.т.н.

Анатолий Григорьевич Суслов<sup>3</sup>, д.т.н.

Анатолий Васильевич Тотай<sup>4</sup>, д.т.н.

<sup>1, 2, 3, 4</sup>Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия

<sup>1</sup> nagorkin\_mn@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4536-7522>

<sup>2</sup> fedorvlad44@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2113-6567>

<sup>3</sup> naukاتم@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2566-2759>

<sup>4</sup> totai\_av@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4794-9881>

**Аннотация.** В статье представлены результаты исследований возможностей технологического управления формированием эксплуатационных параметров шероховатости трибоэлементов соединений трения скольжения комбинированными антифрикционными методами обработки. Возможности технологического управления параметрами шероховатости поверхностей деталей исследовалось для двух вариантов обработки деталей – на основе нанесения твердых износостойких нитридсодержащих покрытий на поверхности деталей и на основе нанесения мягких медесодержащих прирабочных пленок на рабочие поверхности деталей в сочетании с методами обработки поверхностным пластическим деформированием. Поверхностное пластическое деформирование осуществлялось методами алмазного выглаживания или накатыванием шариком. В качестве управляющих факторов в экспериментальных исследованиях рассматривались как условия обработки поверхностей деталей, так и условия их приработки в парах трения скольжения. Приработка соединений осуществлялась на программируемом стенде (машине трения), позволяющем моделировать как статические нагрузки, так и динамические, изменяющиеся по периодическому закону с заданными параметрами. Были получены модели для количественной оценки влияния факторов обработки поверхностей деталей с применением антифрикционных технологий и дальнейшей их приработки в парах трения скольжения на формирование эксплуатационных параметров шероховатости, которые, в свою очередь, оказывают значительное влияние на эксплуатационные свойства трибоэлементов. Для оценки степени влияния технологических факторов обработки на формирование эксплуатационной шероховатости поверхностей деталей осуществлялось их ранжирование методом Парето. Проводилась оценка степени согласованности влияния управляющих факторов на формирование параметров эксплуатационной шероховатости с помощью коэффициента ранговой конкордации. Представленная в статье информация необходима для практического применения в области проектирования технологических методов комбинированной антифрикционной обработки поверхностей деталей соединений трения скольжения машин и механизмов.

**Ключевые слова:** износостойкость, мягкие прирабочные пленки, нитридсодержащие покрытия, алмазное выглаживание, приработка, модели формирования параметров шероховатости

**Для цитирования:** Нагоркин М.Н., Федоров В.П., Суслов А.Г., Тотай А.В. Технологическое управление параметрами эксплуатационной шероховатости поверхностей деталей пар трения скольжения комбинированной антифрикционной обработкой // Наукоёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 12 (150). С. 37–45. doi: 10.30987/2223-4608-2023-37-45

## Technological control of surface operational roughness parameters for sliding friction pairs through combined antifricion surfacing

Maxim N. Nagorkin<sup>1</sup>, D. Eng.

Vladimir P. Fedorov<sup>2</sup>, D. Eng.

Anatoly G. Suslov<sup>3</sup>, D. Eng.

Anatoly V. Totay<sup>4</sup>, D. Eng.

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

**Abstract.** The article presents study results of the technological control ways for roughness operational parameters generation in tribo-elements of sliding friction pairs through combined antifriction surfacing methods. The possibilities of technological control of the roughness parameters of the parts surfaces were studied for two types of part cutting – based on both: the application of hard wear-resistant nitride-containing coatings on the surfaces of parts and on the application of soft copper-containing work plates on the working surfaces of parts in combination with surface plastic deformation technique. Surface plastic deformation was carried out by diamond burnishing or ball burnishing. As controlling factors in experimental studies, both: the conditions for surfacing of parts and the run-in conditions in sliding friction pairs were viewed. Break-in process of pairs was carried out on a programmable testing unit (friction machine), which allows simulating both: static loads and dynamic loads that change together with the specified parameters in a periodic manner. Models for quantitative ratings of the influence of surfacing factors of parts using anti-friction technologies and their further development in sliding friction pairs on operational roughness parameters generation, which, in turn, have a significant impact on the operational properties of tribo-elements. To assess the degree of technological factors effect of the treatment on the generation of operational roughness of parts, their ranking by the Pareto method was carried out. The degree of consistency of control factors impact on operational roughness parameters generation was assessed using the coefficient of rank concordance. The information presented in the article is necessary for practical application in the field of designing technological methods of combined antifriction surfacing of parts for sliding friction pairs of machines and mechanisms.

**Keywords:** wear resistance, soft break-in films, nitride-containing coatings, diamond burnishing, break-in, models for roughness parameters generation

**For citation:** Nagorkin M.N., Fedorov V.P., Suslov A.G., Totay A.V. Technological control of surface operational roughness parameters for sliding friction pairs through combined antifriction surfacing / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 12 (150). P. 37–45. doi: 10.30987/2223-4608-2023-37-45

## Введение

В процессе приработки соединений трения скольжения на контактирующих поверхностях трибоэлементов формируются эксплуатационные (равновесные) параметры качества, числовые значения которых отличаются от параметров качества (технологических), полученных в процессе обработки. К ним в первую очередь относятся параметры шероховатости, физико-механических свойств и др. Эксплуатационные параметры качества определяют важнейшие свойства соединений в процессе нормальной эксплуатации, такие как интенсивность изнашивания, контактную жесткость в динамике при флуктуациях нагрузки и др. [1, 2].

В настоящее время в технологиях антифрикционной обработки могут применяться различные методы модификации поверхностей деталей: использование твердых износостойких покрытий (например, нитридов титана TiN, молибдена MoN и других покрытий), нанесение мягких медесодержащих прирабочных пленок и др. Последующая обработка модифицированных поверхностей методами

поверхностно-пластического деформирования (ППД) позволяет сформировать требуемые параметры качества поверхности.

В статье представлены результаты исследований, позволившие получить модели для количественной оценки влияния факторов обработки поверхностей деталей с применением антифрикционных технологий и дальнейшей их приработки в парах трения скольжения на формирование эксплуатационных параметров шероховатости, которые, в свою очередь, оказывают значительное влияние на эксплуатационные свойства трибоэлементов.

## Методология исследований

Технологическое управление параметрами эксплуатационной шероховатости поверхностей деталей пар трения скольжения исследовалось для двух вариантов комбинированной антифрикционной обработки (КАФО) деталей:

– КАФО на основе нанесения твердых износостойких нитридсодержащих покрытий на поверхности деталей [4];

– КАФО на основе нанесения мягких медесодержащих прирабочных пленок на

рабочие поверхности деталей (охватываемых трибоэлементов) [5].

Оба варианта способствуют повышению износостойкости соединений трения скольжения, снижению пути и времени приработки

$$TC = (O_{11} \vee O_{12} \vee \dots \vee O_{1n}) \wedge (O_{21} \vee O_{22} \vee \dots \vee O_{2n}) \wedge (O_{m1} \vee O_{m2} \vee \dots \vee O_{mn}). \quad (1)$$

Предполагается, что в общем случае ТС может иметь  $m$  технологических операций  $O$ , каждая из которых может быть реализована  $n$  способами обработки.

Технология КАФО может включать три основных этапа обработки деталей.

На первом этапе осуществляется предварительная чистовая обработка поверхности. Технологические операции могут выполняться чистовым точением ( $O_{11}$ ) инструментом с поликристаллическими сверхтвёрдыми материалами или шлифованием ( $O_{12}$ ). Предпочтительнее применение лезвийных методов обработки, при которых исключается процесс шаржирования поверхности. Также могут дополнительно применяться методы ППД.

На втором этапе осуществляется модификация поверхностей деталей нанесением твердых ( $O_{21}$ ) или мягких прирабочных покрытий ( $O_{22}$ ).

Третий этап КАФО связан с формированием требуемых параметров микропрофиля поверхности детали. Обработка осуществляется такими методами ППД, как алмазное выглаживание (АВ) ( $O_{31}$ ), накатывание шариками ( $O_{32}$ ) и др. [5, 6].

Каждый этап обработки преследует свои цели. На первом этапе обеспечивается заданная точность размеров детали и требуемые геометрические параметры качества поверхности для эффективного нанесения покрытий. Например, мягкие прирабочные пленки наносятся фрикционным способом, то шероховатость поверхности должна инициировать процесс микрорезания. На третьем этапе формируется микропрофиль поверхности, исключая процесс микрорезания и обеспечивающий требуемые параметры эксплуатационных свойств, в частности износостойкость [5, 7].

Технологический процесс антифрикционной обработки на основе нанесения твердых

трибоэлементов, коэффициента трения, величины начального износа и др.

Логическую модель технологической системы (ТС) КАФО можно представить в следующем виде:

покрытий включает в себя следующие операции:

1. Предварительная обработка поверхности вала для обеспечения точности сопряжения поверхностей в узлах типа подшипников скольжения. Управляющий фактор  $X_1$  предполагает точение эльбором или круглое шлифование.

2. Алмазное выглаживание для подготовки поверхности под нанесение твердых нитридсодержащих покрытий. Управляющий фактор  $X_2$  – сила выглаживания  $Q_1$ , значения которой варьируются от 100 Н до 400 Н. Радиус индентора инструмента –  $r = 3,0$  мм.

3. Нанесение твёрдого покрытия методом катодно-ионной бомбардировки в вакууме по известной технологии. Управляющий фактор  $X_3$  – вид покрытия  $M_1$ : TiN или MoN.

4. Алмазное выглаживание поверхности для формирования заданных триботехнических характеристик. Управляющий фактор  $X_4$  – сила выглаживания  $Q_2$ , значения которой варьируются от 50 Н до 150 Н. Радиус индентора инструмента –  $r = 3,0$  мм.

Для исследований образцы валов изготавливались из стали 45, закаленной до HRC 48...50.

Анализ параметров микропрофиля поверхности детали после четвертой операции показал, что его высотные характеристики после АВ уменьшились примерно в 10 раз, радиус закругления вершин увеличился более чем в 25 раз, а отношение  $R_{max}/\bar{r} \approx 7 \cdot 10^{-4}$ , что должно способствовать пластическому отеснению материала сопряжённого контртела при трении. Особо необходимо отметить снижение примерно в  $10^4$  раз величины безразмерного комплекса Крагельского-Комбалова  $\Delta$ , что указывает на возросшие триботехнические свойства поверхности.

Приработка соединений осуществлялась на специальной машине трения, которая

позволяла моделировать нагрузки от статической до динамических, изменяющихся по периодическому закону с заданными параметрами.

Триботехнические испытания соединений проводились на программируемом стенде (машина трения) который позволял моделировать изменение нагрузок от статических до динамических, изменяющихся по периодическому закону с заданными параметрами [3]. В качестве управляющих факторов рассматривались скорость  $v_{пр}$  относительного скольжения поверхности трибоэлементов в процессе приработки, величина номинальной погонной нагрузки  $P_{пр}$  на трибосопряжение в процессе приработки, процент вариаций  $\Delta P$  номинальной погонной нагрузки на трибосоединение в процессе приработки при моделировании динамических условий эксплуатации и материал вкладыша  $M_i$  [4, 5, 7, 8].

Процесс формирования параметров эксплуатационной шероховатости пар трения скольжения в динамике рассматривался с точки зрения влияния как технологических факторов КАФО ( $X_1 - X_4$ ), так и факторов приработки соединения ( $X_5 - X_9$ ):  $X_5$  – материал  $M_2$  мягкого покрытия вкладыша, получаемого гальваническим способом (медь или олово + висмут);  $X_6$  – погонная нагрузка  $P_{пр}$  на соединение при изнашивании ( $P_{пр\ min} = 40$  Н/мм;  $P_{пр\ max} = 60$  Н/мм);  $X_7$  – скорость  $v_{пр}$  относительного скольжения трибоэлементов ( $v_{пр\ min} = 10$  м/мин;  $v_{пр\ max} = 60$  м/мин);  $X_8$  – величина изменения  $\Delta P$  номинальной погонной нагрузки ( $\Delta P_{min} = 15\%$ ;  $\Delta P_{max} = 25\%$ );  $X_9$  – смазка, используемая при стендовых испытаниях (ИС 20 или МГ-10).

Коэффициенты и параметры моделей

формирования параметров шероховатости в ТС КАФО на основе применения твёрдых покрытий определялись путем обработки результатов активных экспериментов, выполненных по планам в виде дробных реплик типа  $2^{9-5}$  [5].

При исследовании формирования эксплуатационной шероховатости в процессе приработки поверхностей трибоэлементов, полученных в ТС КАФО на основе нанесения мягких медесодержащих прирабочных плёнок рассматривалось двенадцать управляющих факторов: скорость  $v_T$  резания; подача инструмента  $S_T$  и глубина  $t$  резания при точении стали 45 композитом 10; жёсткость  $j$  ТС;  $M_{п}$  – материал мягкой прирабочной пленки на поверхности вала (получена фрикционным латунированием или химическим меднением); сила  $Q_{AB}$  алмазного выглаживания, продольная подача  $S_{AB}$  при АВ, скорость выглаживания  $v_{AB}$ ; материал  $M_{вкл}$  вкладыша (бронза ОЦС 5-5-5 или антифрикционный чугун АЧС1), скорость  $v_{пр}$  относительного скольжения поверхностей трибоэлементов в процессе приработки; величина номинальной погонной нагрузки  $P_{пр}$  на трибосопряжение в процессе приработки; процент вариаций  $\Delta P$  номинальной погонной нагрузки на трибосоединение в процессе приработки [5, 7].

Факторная область эксперимента по исследованию формирования параметров шероховатости в ТС КАФО на основе применения медесодержащих прирабочных плёнок представлена в табл. 1, а сами исследования проводились методом активного эксперимента путем реализации регулярной дробной реплики типа  $2^{12-8}$  от полного факторного эксперимента.

## 1. Исследуемая область факторного пространства

### 1. The studied area of the factor space

Код фактора	Факторы											
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$X_9$	$X_{10}$	$X_{11}$	$X_{12}$
	$v_T$	$S_T$	$t$	$j$	$M_{п}$	$Q_{AB}$	$S_{AB}$	$v_{AB}$	$M_{вкл}$	$v_{пр}$	$P_{пр}$	$\Delta P$
–	65	0,05	0,10	2,50	1,5	100	0,075	65	2,0	10	30	0,15
+	200	0,15	0,25	1,62	3,0	300	0,150	100	5,0	50	50	0,25

### Результаты

В результате обработки экспериментальных данных по известной методике [5, 10, 11], получены адекватные модели формирования параметров эксплуатационной шероховатости. Для ТС КАФО на основе применения твёрдых покрытий модели имеют вид:

$$Y_i = b_0 k_1 k_2 k_3 k_4 Q_1^{b_1} Q_2^{b_2} P_{\text{пр}}^{b_3} v_{\text{пр}}^{b_4} (\Delta P)^{b_5}, \quad (2)$$

$$Y_i = b_0 K_1 K_2 v_T^{b_1} S_T^{b_2} t^{b_3} j^{b_4} Q_{\text{AB}}^{b_6} S_{\text{AB}}^{b_7} v_{\text{AB}}^{b_8} v_{\text{пр}}^{b_{10}} P_{\text{пр}}^{b_{11}} \Delta P^{b_{12}}, \quad (3)$$

где  $Y_i$  –  $i$ -й параметр эксплуатационной шероховатости;  $K_1, K_2$  – коэффициенты, учитывающие вид прирабочной плёнки и материал вкладыша (рассчитываются возведением их кодированных значений в соответствующую

где:  $Y_i$  –  $i$ -й параметр эксплуатационной шероховатости;  $k_1, k_2, k_3, k_4$  – коэффициенты влияния вида предварительной обработки, материала покрытия вала, материала покрытия вкладыша и вида смазки соответственно;  $b_0, b_i$  – параметры модели.

Для ТС КАФО на основе применения мягких медесодержащих прирабочных покрытий модели формирования параметров эксплуатационной шероховатости имеют вид:

степень ( $b_5$  и  $b_9$ ));  $b_0, b_i$  – коэффициенты модели.

Например, модель формирования параметра  $Ra$ , мкм, имеет вид:

$$Ra = 8,82 \cdot 10^{-6} K_1 K_2 \frac{v_T^{0,71} \left( \frac{\Delta P}{P_{\text{пр}}} \right)^2}{S_T^{0,07} t^{0,17} j^{0,15} Q_{\text{AB}}^{0,23} S_{\text{AB}}^{0,22} v_{\text{AB}}^{2,58} v_{\text{пр}}^{0,3} P_{\text{пр}}^{0,72}} \text{ [мкм]}.$$

Эволюцию технологического профиля шероховатости поверхностей в эксплуатационный можно проследить на примере поверхности вала пары трения, поверхности образцов которых обрабатывались в ТС КАФО на основе применения мягких медесодержащих прирабочных покрытий. Значения факторов  $X_2, X_4, X_5, X_7, X_{10}, X_{12}$  для рассматриваемого случая приняты максимальными, а остальных факторов – минимальными (табл. 1).

После чистового точения на поверхность образца фрикционным латунированием наносилась мягкая прирабочная плёнка, а затем осуществлялось алмазное выглаживание поверхности. Затем в сборе со вкладышем из чугуна АЧС1 осуществлялась приработка в соответствии с планом эксперимента. По завершению процесса приработки на функциональных поверхностях обоих трибоэлементов сформировался эксплуатационный микропрофиль, фрагменты которого, а также параметры шероховатости и фрагменты топографии поверхности вала показаны на рис. 1.

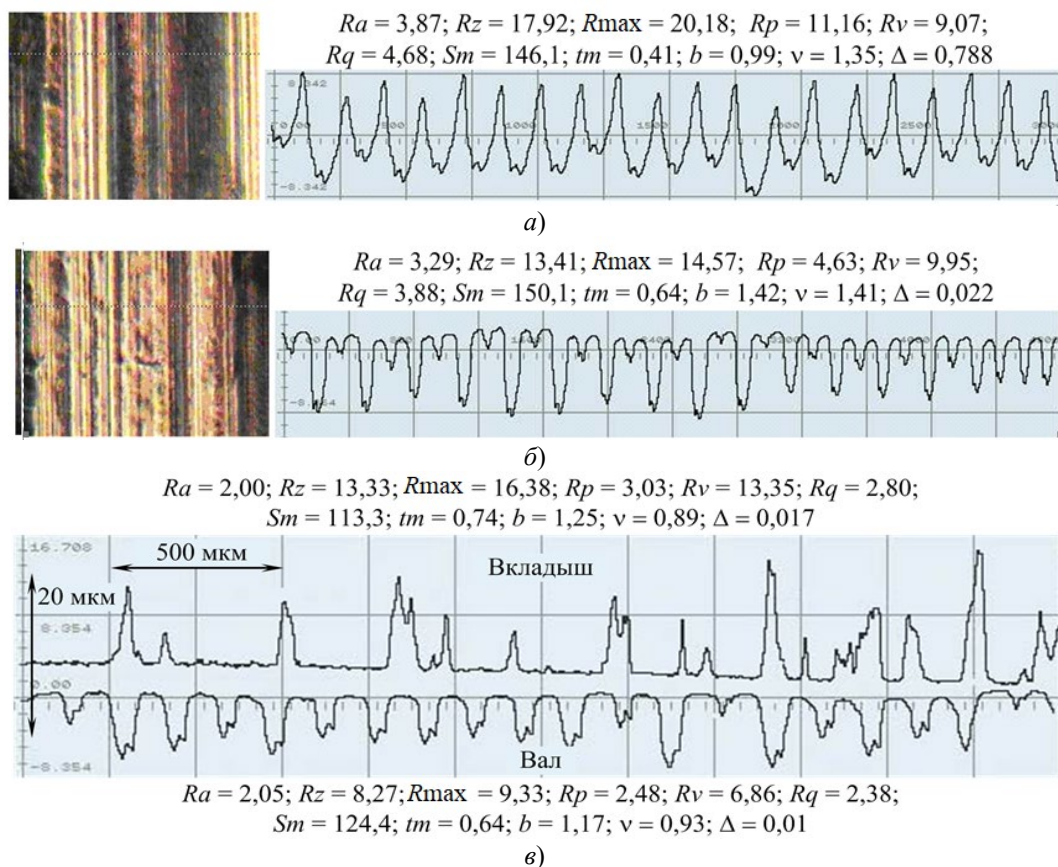
Измерение параметров шероховатости осуществлялась, с использованием компьютеризированных систем металлографического анализа и исследования микропрофиля поверхностей [5, 10, 11]. Профилограммы сняты в одном масштабе. Обращает на себя внимание приглядность поверхностей друг к другу, то есть имеет место действительный факт их

приработки.

Динамику эволюции поверхности вала можно проследить по отдельным параметрам от чистового точения до завершения процесса приработки (рис. 1).

Так, например, параметр  $\Delta = 0,79$  после чистового точения, а в процессе последующих фрикционного латунирования и алмазного выглаживания уменьшается до 0,022, т. е. в 35,08 раза. Величина  $\Delta$  при своём уменьшении способствует увеличению износостойкости. По окончании процесса приработки эта величина претерпевает дальнейшее уменьшение до 0,01, т. е. становится в 2,2 раза меньше технологического значения.

Сравнение микрофотографий поверхности вала, представленных на рис. 1, показывает, что в процессе приработки мягкая прирабочная плёнка не ликвидируется, а сама поверхность теряет эффект сглаживания вершин профиля (рис. 1, б) и носит на себе следы микроцарапания, которое происходит либо посредством контактирующей поверхности вкладыша, либо посредством частиц продуктов изнашивания.



**Рис. 1.** Эволюция микропрофиля поверхностей образцов в процессе отдельных этапов жизненного цикла:  
 а – предварительное точение; б – последующее нанесение мягкой плёнки и алмазное выглаживание;  
 в – окончание процесса приработки

**Fig. 1.** The evolution of the microprofile of the sample surfaces during individual stages of the life cycle:  
 a – preliminary turning; b – subsequent application of a soft film and diamond burnishing; c – the end of the break in process

Вид эксплуатационной шероховатости поверхности вкладыша отличается от исходной, которая имела следующие параметры:  $Ra = 1,52$  мкм;  $Rz = 7,8$  мкм;  $Rmax = 8,9$  мкм;  $Rp = 3,2$ ;  $Sm = 105$  мкм;  $b = 0,91$ ;  $v = 1,95$ ;  $\Delta = 0,6$ . Сравнивая эти параметры с параметрами, представленными на рис. 2, в, следует отметить, что микропрофиль поверхности вкладыша претерпел значительные изменения. Высотные параметры  $Ra$ ,  $Rz$ ,  $Rmax$  увеличились, причём параметр  $Rmax$  увеличился почти в 2,0 раза, однако параметр  $Ra$  практически не изменился. Это говорит о том, что резко возросла несущая способность поверхности. Об этом свидетельствует сравнение величин  $b$  и  $v$  технологической и эксплуатационной шероховатости. Величина  $\Delta$  для поверхности вкладыша уменьшилась в 3,3 раза, что также

указывает на повышение триботехнических характеристик эксплуатационного профиля по сравнению с технологическим.

Представленный пример показывает, что в процессе приработки высотные параметры шероховатости не всегда должны уменьшаться. Они могут и увеличиваться. Это может благоприятно сказываться и на повышении износостойкости пары в целом, т. к. при этом создаются дополнительные микрообъёмы, которые могут служить как своеобразными «хранилищами» смазки, так и «приёмниками» продуктов изнашивания.

Интервалы варьирования параметров эксплуатационной шероховатости образцов в исследуемой области факторного пространства ТС КАФО для различных видов КАФО представлены в табл. 2 и табл. 3.

**2. Интервалы варьирования параметров эксплуатационной шероховатости на основе применения твёрдых покрытий**

**2. Intervals of variation of operational roughness parameters based on the use of hard coatings**

Вал				
$Ra$ , мкм	$R_{max}$ , мкм	$Rp$ , мкм	$\rho_m$ , мкм	$\Delta$
0,53...0,12	5,78...1,3	4,25... 0,75	125... 13,0	0,45... 0,03
Вкладыш				
$Ra$ , мкм	$R_{max}$ , мкм	$Rp$ , мкм	$\rho_m$ , мкм	$\Delta$
1,0...0,2	10,0...2,5	8,3...1,9	180...15	0,5... 0,07

**3. Интервалы варьирования параметров эксплуатационной шероховатости на основе применения медесодержащих пленок**

**3. Intervals of variation of operational roughness parameters based on the use of copper-containing films**

Вал					
$Ra$ , мкм	$R_{max}$ , мкм	$Rp$ , мкм	$\rho_m$ , мм	$b$	$v$
0,56...12,2	2,9...47,0	0,66...13,4	0,1...4,8	0,76...2,0	0,8...1,6
Вкладыш					
$Ra$ , мкм	$R_{max}$ , мкм	$Rp$ , мкм	$\rho_m$ , мм	$b$	$v$
0,02... 11,5	0,12...58,0	0,06...15,2	0,19... 17,6	0,48... 1,34	0,8...2,35

С целью оценки степени влияния факторов КАФО на формирование эксплуатационной шероховатости поверхностей деталей осуществлялось их ранжирование методом Парето.

Анализ диаграмм Парето (рис. 2) показывает, например, что на эксплуатационный параметр  $Ra$  шероховатости поверхности вала, полученной после обработки в ТС КАФО на основе применения твёрдых покрытий, превалирующее влияние оказывает сила алмазного выглаживания перед нанесением покрытия (30,6 %) (см. рис. 2, а), а на соответствующий параметр вкладыша (см. рис. 2, б) наибольшее влияние оказывает метод предварительной обработки, причём предварительная обработка круглым шлифованием способствует уменьшению данного показателя примерно на 26 %. Аналогично можно проанализировать влияние рассматриваемых факторов на все остальные параметры. Диаграммы Парето позволяют провести ABC – анализ влияния исследуемых факторов на формирование эксплуатационных параметров шероховатости. В группу А входят факторы обработки, определяющие до 75 % изменчивости рассматриваемого параметра, а в группы В и С – соответственно от 75 % до 95 % и от 95 % до 100 %, что позволяет наиболее эффективно управлять процессом обработки и приработки по тем или иным критериям.

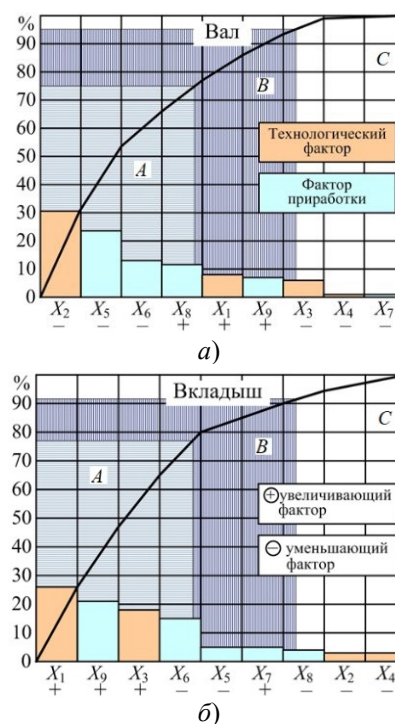


Рис. 2. Диаграммы Парето влияния на формирование параметра  $Ra$  эксплуатационной шероховатости управляющих факторов в ТС КАФО на основе применения твёрдых покрытий:

а – для поверхности вала; б – для поверхности вкладыша

Fig. 2. Pareto diagrams of the influence on the generation of operational roughness parameter  $Ra$  for control factors in the TS KAFO based on the use of hard coatings:

а – for the surface of the shaft; б – for the surface of the bushing

Возникает вопрос о степени согласованности влияния исследуемых факторов на формирование рассматриваемых параметров, в данном случае – параметров эксплуатационной шероховатости. Оптимально, когда она составляет 100 %, но это, в силу сложности процессов, происходящих при обработке деталей и приработке пар трения скольжения практически неосуществимо. Оценить степень согласованности предлагается с помощью коэффициента ранговой конкордации  $W$ , при этом, исследуемые параметры выступают как бы в роли «независимых экспертов», которые ранжируют факторы обработки (рис. 2):

$$W = \frac{12S}{m^2(n^3 - n)}, \quad (4)$$

где  $m$  – число параметров;  $n$  – число факторов;  $S$  – сумма квадратов отклонений.

Использовать коэффициент конкордации можно после оценки его значимости, которая возможна с помощью специальных таблиц или известных статистических распределений. Например, величина  $m(n-1)W$  имеет  $\chi^2$ -распределение с числом степеней свободы  $f = n - 1$ . Значение  $\chi^2$ -критерия определяют по зависимости:

$$\chi^2 = \frac{12S}{mn(n+1)}. \quad (5)$$

Гипотеза о наличии согласия «экспертов» может быть принята, если при заданном числе степеней свободы табличное значение  $\chi^2$  меньше расчётного для 5,0 %-ного уровня значимости.

Оценив согласованность мнений всех «экспертов», строится средняя диаграмма рангов, откладывая по одной оси факторы, а по другой – соответствующие суммы рангов (рис. 3). Чем меньше сумма рангов данного фактора, тем выше его место на диаграмме. С помощью суммы рангов оценивается значимость факторов.

Анализ процессов формирования эксплуатационных параметров шероховатости показал:

– на параметры  $Ra$ ;  $Rp$ ;  $\rho$ ;  $\Delta$  шероховатости вала 39 % влияния оказывают технологические факторы обработки в ТС КАФО, а 61 % – факторы приработки ( $W = 0,52$  и  $\chi^2_{\text{расч}} = 16,7$ );

– для параметров эксплуатационной шероховатости вкладышей эти показатели составляют соответственно 42 % и 58 % при  $W = 0,53$  и  $\chi^2_{\text{расч}} = 17$ .

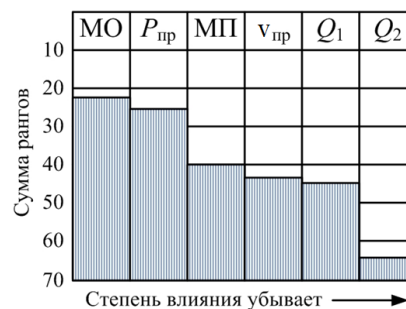


Рис. 3. Диаграмма ранжирования управляющих факторов в ТС КАФО на основе применения твёрдых покрытий по степени влияния на параметры эксплуатационной шероховатости:

МО – метод предварительной обработки;  $P_{\text{пр}}$  – величина номинальной погонной нагрузки на трибосопряжение в процессе приработки; МП – материал покрытия поверхности детали;  $v_{\text{пр}}$  – скорость относительного скольжения в процессе приработки;  $Q_1, Q_2$  – силы выглаживания

Fig. 3. Ranking diagram of the control factors in the TS KAFO based on the use of hard coatings according to the degree of influence on the parameters of operational roughness: МО – roughing operation technique;  $P_{\text{pr}}$  – the value of the nominal linear load on the tribounit during breakinin; MP – the material of the part surface coating;  $v_{\text{pr}}$  – speed of slippage in the process of breakinin;  $Q_1, Q_2$  – burnishing forces

Результаты анализа диаграмм Парето показывают, что в исследуемой триботехнологической системе технологические факторы обработки в ТС КАФО оказывают влияние на формирование параметров шероховатости в среднем на 47,3 %, а факторы приработки – на 52,7 %.

Аналогичные результаты получены и для триботехнологической системы после обработки деталей в ТС КАФО на основе нанесения медесодержащих приработочных пленок.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Инженерия** поверхности деталей / А. Г. Суслов, В. Ф. Безъязычный, Ю. В. Панфилов [и др.]; под редакцией А. Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2008. 320 с.
2. **Технологическое** обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений / А.Г. Суслов, В.П. Федоров, О.А. Горленко [и др.]; под общ. ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2006. 447 с.
3. **Горленко О.А., Шохийн А.Н., Щербаков А.Н.** Технологические методы продления долговечности цилиндрических поверхностей трения // Научно-технические технологии в машиностроении. 2023. № 2 (140) С. 40–48. doi:10.30987/2223-4608-2023-2-40-48.
4. **Моргаленко Т.А.** Технология обработки поверхностей трения скольжения, основанная на применении твердых износостойких покрытий с учетом влияния технологической наследственности // Научно-технические технологии в машиностроении. 2020. № 12 С. 31–38. doi:10.30987/2223-4608-2020-12-31-38.



5. **Нагоркин М. Н.** Параметрическая надёжность технологических систем чистовой и отделочно-упрочняющей обработки поверхностей деталей машин инструментами из сверхтвёрдых синтетических материалов: монография / под ред. А. В. Киричека. М.: Издательский дом «Спектр», 2017. 304 с.

6. **Nagorkin M.N., Fyodorov V.P., Kovalyova E.V.** Modeling of process of forming quality parameters for surfaces of parts by diamond burnishing taking into account technological heredity. In: IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 327, 042071 (2018).

7. **Nagorkin M.N., Fyodorov V.P., Nagorkina V.V.** Simulation modelling of tribotechnologies system and its parametric reliability assessment on tribotechnical parameters of the joints of sliding friction. In: IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 177, 012079 (2017).

8. **Федоров В. П., Суслов А. Г., Нагоркин М. Н.** Диагностика технологических систем по надёжности обеспечения заданных параметров качества обрабатываемых поверхностей деталей // Научно-технические технологии в машиностроении. 2020. № 1 (103). С. 15–24. doi:10.30987/2223-4608-2020-1-15-24.

9. **Аверченков В.И., Федоров В.П., Хейфец М.Л.** Основы математического моделирования технических систем. М.: Флинта, 2021. 271 с.

10. **Федоров В.П., Нагоркин М.Н., Вайнер Л.Г.** Методологические основы диагностики технологических систем металлообработки по параметрической надёжности обеспечения заданного качества обрабатываемых поверхностей // Вестник Брянского государственного технического университета. 2021. № 11 (108). С. 49–63. doi:10.30987/1999-8775-2021-11-36-50.

11. **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 // Научно-технические технологии в машиностроении. 2018. № 10. С. 3–13. doi:10.30987/article 5bb4b1f9abbc54.46761484.

## REFERENCES

1. Engineering of parts surface / A. G. Suslov, V. F. Bez'yazichniy, Yu. V. Panfilov [et al.]; edited by A. G. Suslov. Moscow: Mashinostroenie, 2008. 320 p.

2. Technological support and operation properties increase of parts and their joints/ A.G. Suslov, V.P. Fedorov, O.A. Gorlenko

[et al.]; under the general editorship of A.G. Suslov. Moscow: Mashinostroenie, 2006. 447 p.

3. Gorlenko O.A., Shokhin A.N., Shcherbakov A.N. Technological methods for durability extending of cylindrical friction surfaces // Science-intensive technologies in mechanical engineering, 2023, No. 2 (140) pp. 40–48. doi:10.30987/2223-4608-2023-2-40-48

4. Morgalenko T.A. Technology of sliding friction surface machining based on hard wear-resistant coating use taking into account technological inheritance impact / Science-intensive technologies in mechanical engineering, 2020, No. 12 pp. 31–38. doi :10.30987/2223-4608-2020-12-31-38.

5. Nagorkin M.N. Parametric reliability of machinery surface finishing and strengthening with super-hard synthetic tools: monograph / M.N. Nagorkin; under the editorship of A.V. Kirichek. Moscow: Spectrum, 2017, 304p.

6. Nagorkin M.N., Fyodorov V.P., Kovalyova E.V. Modeling of process of forming quality parameters for surfaces of parts by diamond burnishing taking into account technological heredity. In: IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 327, 042071 (2018).

7. Nagorkin M.N., Fyodorov V.P., Nagorkina V.V. Simulation modelling of tribotechnologies system and its parametric reliability assessment on tribotechnical parameters of the joints of sliding friction. In: IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 177, 012079 (2017).

8.8. Fedorov V. P., Suslov A. G., Nagorkin M. N. Diagnostics of technological systems according to parametric reliability of ensuring a given quality of the treated surfaces/ Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2020, No. 1 (103), pp. 15–24. doi :10.30987/2223-4608-2020-2020-1-15-24.

9. Averchenkov V.I., Fedorov V.P., Heifets M.L. Fundamentals of mathematical modeling of technical systems. Moscow: Flint, 2021, 271 p.

10. Fedorov V.P., Nagorkin M.N., Weiner L.G. Methodological foundations of diagnostics of technological metalworking systems based on parametric reliability of ensuring a given quality of the treated surfaces // Bulletin of the Bryansk State Technical University. 2021, No. 11 (108). pp. 49–63. doi:10.30987/1999-8775-2021-11-36-50.

11. Suslov A.G., Fedorov V.P., Nagorkin M.N., Pyrikov I.L. Complex approach to experimental investigations of metalworking technological systems to ensure parameters of quality and operation properties of machinery surfaces/Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2018, No. 10, pp. 3–13. doi:10.30987/article 5bb4b1f9abbc54.46761484

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 05.09.2023; одобрена после рецензирования 21.09.2023; принята к публикации 08.11.2023.

The article was submitted 05.09.2023; approved after reviewing 21.09.2023; assepted for publication 08.11.2023.