

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.9

doi: 10.30987/2782-5957-2024-8-31-43

КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СОЕДИНЕНИЙ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ПРИРАБОТКИ ПРИ СТУПЕНЧАТОМ НАГРУЖЕНИИ

Владимир Павлович Федоров¹, Максим Николаевич Нагоркин^{2✉}, Леонид Григорьевич Вайнер³, Елена Владимировна Ковалева⁴

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

³Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, Россия

¹fedorvlad44@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2113-6567>

²nagorkin_mn@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4536-7522>

³lgvainer@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2460-2340>

⁴lenako1965@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0002-4783-462X>

Аннотация

В статье рассматриваются вопросы технологического обеспечения показателя грузоподъемности цилиндрических соединений трения скольжения в процессе приработки при ступенчато возрастающей нагрузке. Грузоподъемность соединений трения скольжения является одной из трибологических характеристик, зависящая от конструкторских и технологических факторов. Представлены результаты исследований триботехнических характеристик цилиндрических пар трения скольжения, работающих в условиях граничного трения, рабочие поверхности трибоэлементов которых после предварительной чистовой обработки (точение композитом 10 или шлифование периферией абразивного круга) подвергались различным технологическим методам антифрикционной обработки. В частности, рассматривались методы, включающие: 1) нанесение прирабочных мягких плёнок на поверхности трибоэлементов (валов) гальваническими методами; 2) нанесение прирабочных мягких медесодержащих плёнок на поверхности трибоэлемента (валов) фрикционным латунированием или химическим меднением; 3) модифицирование поверхностей трибоэлементов твёрдыми нитридсодержащими покрытиями (комбинированная обработка) в сочетании с мягкими прирабочными пленками с последующей отделочно-упрочняющей обработкой поверхностей методами поверхностно-

го пластического деформирования. Модели валов изготавливались из стали 45 с последующей закалкой, а вкладышей – из рекомендуемых в справочной литературе подшипниковых материалов (алюминий-Д, антифрикционный чугун АЧС-1; баббит Б-88; бронза БрОЦС-5-5-5). Представлены логические модели рассматриваемых методов антифрикционной обработки и обоснование их применения. Экспериментальные исследования проводились методами активного эксперимента на специальном испытательном стенде, имеющем широкий диапазон изменения нагрузок на модель испытуемого соединения и скоростей относительного скольжения трибоэлементов. Статистическая обработка результатов экспериментов позволила установить влияние исследуемых конструкторско-технологических факторов и условий приработки на триботехнические характеристики соединений. Проведен анализ результатов исследований и на его основе даны практические рекомендации для их использования. Получены адекватные модели формирования грузоподъемности соединений, которые рекомендуется учитывать на этапах их конструирования (выбор материалов и покрытий), обработки и приработки.

Ключевые слова: грузоподъемность, приработка, обеспечение, коэффициент трения, обработка, покрытие, эксперимент, модели, соединение.

Ссылка для цитирования:

Федоров В.П. Конструкторско-технологическое обеспечение триботехнических параметров соединений трения скольжения в процессе приработки при ступенчатом нагружении / В.П. Федоров, М.Н. Нагоркин, Л.Г. Вайнер, Е.В. Ковалева // Транспортное машиностроение. – 2024. – № 8. – С. 31-43. doi: 10.30987/2782-5957-2024-8-31-43.

Original article

Open Access Article

DESIGN AND TECHNOLOGICAL SUPPORT OF TRIBOTECHNICAL PARAMETERS OF SLIDING FRICTION JOINTS DURING RUNNING-IN UNDER STEP STRESS

Vladimir Pavlovich Fedorov¹, Maksim Nikolaevich Nagorkin^{2✉}, Leonid Grigoryevich Vayner³, Elena Vladimirovna Kovaleva⁴

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

³Pacific National University, Khabarovsk, Russia

¹ fedorvlad44@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2113-6567>

² nagorkin_mn@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4536-7522>

³ lgvainer@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2460-2340>

⁴ lenako1965@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0002-4783-462X>

Abstract

The paper deals with the issues of technological support to provide the load capacity index of cylindrical sliding friction joints during running-in under step stress. The load capacity of sliding friction joints is one of the tribological characteristics, depending on design and technological factors. The results of studying tribotechnical characteristics of cylindrical sliding friction pairs operating under boundary friction conditions are presented. The working surfaces of these triboelements after preliminary finishing (turning with composite 10 or grinding with the periphery of an abrasive wheel) were subjected to various technological methods of antifriction treatment. In particular, the following methods are considered: 1) application of break-in soft films on the surface of triboelements (shafts) by plating methods; 2) application of break-in soft copper-containing films on the surface of the triboelement (shafts) by friction brassing or chemical copper plating; 3) modification of the surfaces of triboelements with solid nitride-containing coatings (combined treatment) in combination with soft break-in films followed by finishing and hardening surface treatment by surface plastic deformation methods. The shafts were made of

45 steel with subsequent hardening, and the inserts were made of bearing materials recommended in the reference literature (antifriction cast iron АЧС-1; babbit Б -88; bronze БрОЦС -5-5-5). Logical models of antifriction treatment methods under consideration and the rationale for their application are presented. Experimental studies were carried out by methods of active experiment on a special test bench having a wide range of changes in stresses on the model of the tested compound and relative sliding velocities of triboelements. Statistical treatment of experimental results made it possible to find out the influence of the studied design and technological factors and running-in conditions on the tribotechnical characteristics of the compounds. The research results are analyzed and on their basis practical recommendations for their use are given. Adequate models of forming the load capacity of joints are obtained, which are recommended to be taken into account at the stages of their design (selection of materials and coatings), machining and running-in.

Keywords: load capacity, running-in, provision, friction factor, machining, coating, experiment, models, joints.

Reference for citing:

Fedorov VP, Nagorkin MN, Vayner LG, KovalevaEV. Design and technological support of tribotechnical parameters of sliding friction joints during running-in under step stress. *Transport Engineering*. 2024;8:31-43. doi: 10.30987/2782-5957-2024-8-31-43.

Введение

Актуальность задач, связанных с повышением износостойкости деталей соединений трения скольжения, обусловлена тем, что до 80 % машин и механизмов выходят из работоспособного состояния по причине износа [1]. Одним из направлений решения таких задач является исследование и разработка технологических методов антифрикционной обработки деталей машин, оптимального выбора материалов деталей соединений, что, в свою очередь, является актуальной задачей современного машиностроения [1].

Исследовалось влияние конструктор-

ских и технологических факторов на грузоподъемность цилиндрических соединений трения скольжения, работающих в условиях граничного трения при ступенчатой возрастающей нагрузке в процессе приработки.

Грузоподъемность – максимальная нагрузка, которую система скольжения или качения может выдержать без разрушения или изнашивания, превышающего проектные пределы [2].

Коэффициент грузоподъемности пары трения K оценивается отношением:

$$K_r = P_{2m} / P_{1m}. \quad (1)$$

Здесь P_{2m} и P_{1m} – грузоподъёмности пары трения скольжения, работающей при режимах нагружения 2 и 1 до начала схватывания. Режимы 2 и 1 отличаются величиной ступени изменения нагрузки ($\Delta P_2 > \Delta P_1$), ступенчатое приращение которой происходит через одинаковые пути трения (рис. 1а).

Близость коэффициента K_r грузоподъёмности к единице является одним из критериев триботехнической эффективности технологического процесса.

Также в процессе испытаний на износостойкость исследуемых соединений оценивались: температура t в зоне контакта поверхностей трибоэлементов и коэф-

Методика проведения исследований

График ступенчатого нагружения пары трения скольжения в процессе приработки представлен на рис. 1а. В ходе исследований величина приращения нагрузки ΔP регламентировалась планом эксперимента и в его пределах оставалась постоянной для каждого опыта, а путь трения на каждой ступени нагружения составлял $\Delta L = 500$ м. Максимальная величина нагрузки $P_m = n(\Delta P)$ или предельная величина числа ступеней нагружения n ограничивались появлением признаков начала процесса схватывания поверхностей трибоэлементов.

В испытательный стенд, схема которого представлена на рис. 1в, входят: модель трибоэлемента 1 (вал $\varnothing 50$ мм); роликовые подшипники 2; опоры 3; муфта компенсационная 4; двигатель 5 с регулятором скорости; вкладыш 6 (втулка); динамометр 7; устройство 8 гашения действия момента трения на нагрузочные элементы; датчики нагрузки 9; штифт 10; тензобалка равного сопротивления 11; тензодатчики 12.

Испытательный стенд позволяет изменять в широком диапазоне нагрузки на соединения и скорости относительного скольжения трибоэлементов во время приработки.

Специальный датчик позволяет измерять непосредственно в процессе испытаний величины сближения поверхностей за счет износа, а также за счет изменения

коэффициенты трения $f_{тр}$.

Область значений коэффициентов трения $f_{тр}$ представляет множество измеренных в процессе испытаний величин $f_{тр} \in R(f_{max}, \dots, f_{min})$, которые в совокупности представляют собой зависимость $f_{тр} = f(L)$, где L – путь трения. Коэффициенты трения f_1 в начале и f_2 в конце приработки определяются соотношениями $f_1 = f_{max}$, $f_2 = f_{min}$. Величина f_{max} регистрировалась непосредственно после запуска испытательного стенда при его устойчивой работе, а величина f_{min} – в конце процесса приработки до перехода соединения в режим схватывания.

величины нагрузки (контактная податливость соединения).

Смазка подавалась капельным способом с интенсивностью 2...3 капли в минуту. Регистрация величин нагрузки P и коэффициента трения $f_{тр}$ осуществлялась методом осциллографирования. Фрагмент типовой осциллограммы показан на рис. 1а.

Величина текущего износа поверхностей трибоэлементов в процессе приработки измерялась методом профилографирования с использованием естественной базы, которой служила линия, проходящая через вершины выступов профиля шероховатости поверхности до приработки (рис. 1б).

Температура в процессе приработки измерялась в окрестности зоны контакта прирабатываемых поверхностей помощью регистрирующего прибора КВП-503 с хромель-копелевой термопарой, которая располагалась на расстоянии 0,3...0,5 мм от зоны контакта.

Исследовались триботехнические характеристики пар трения, в которых требуемые параметры качества контактирующих поверхностей образцов обеспечивались различными антифрикционными методами обработки:

- 1) нанесение на поверхности трибоэлементов (модели валов) прирабочных мягких плёнок гальваническими методами;
- 2) нанесение на поверхности трибо-

элементов (модели валов) приработочных мягких медесодержащих плёнок фрикционным латунированием или химическим меднением;

3) нанесение на поверхности трибоэлементов твёрдых нитридсодержащих покрытий.

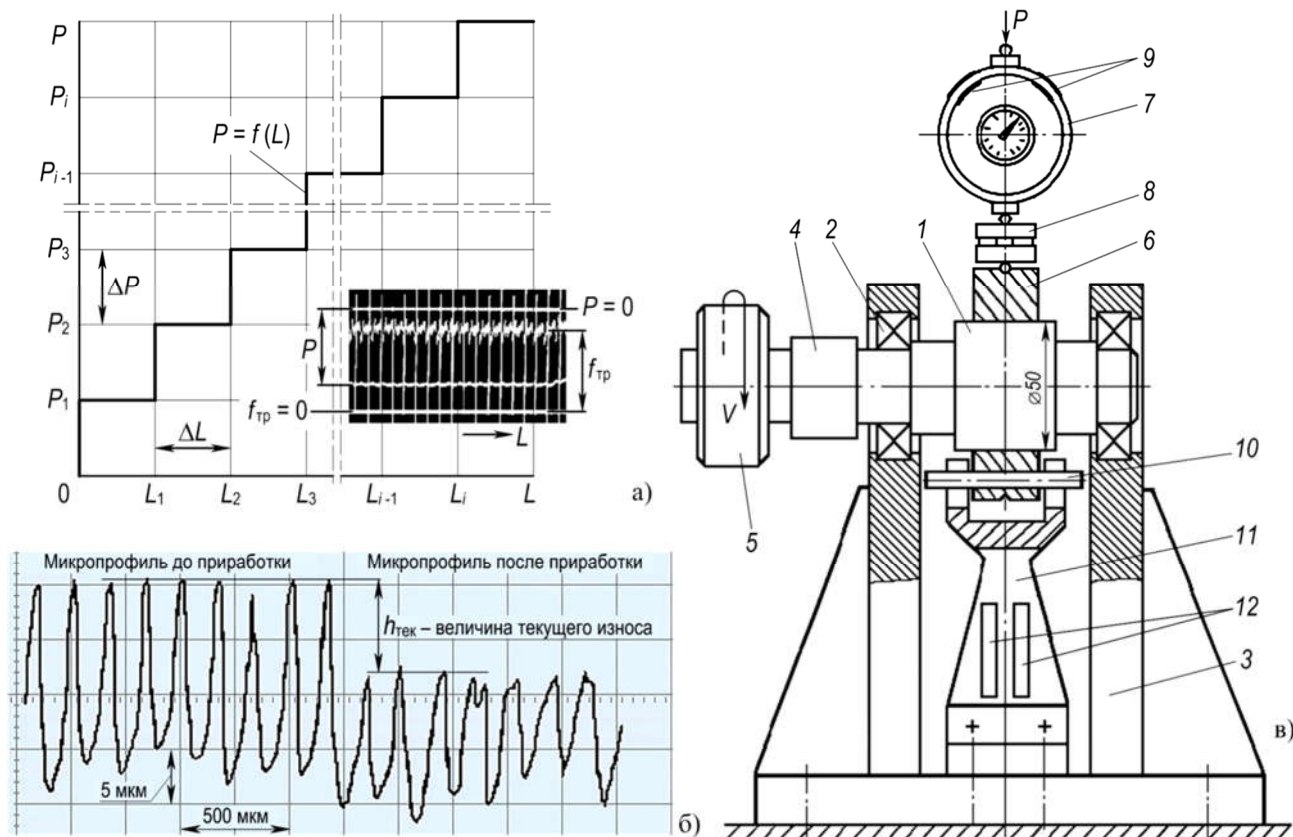


Рис. 1. Испытательный стенд: а – график ступенчатого нагружения пары трения скольжения в процессе приработки и типовая осциллограмма регистрации нагрузки P и текущего значения коэффициента трения $f_{тр}$; б – профилограмма для определения текущего износа поверхности методом естественной базы;

в – схема испытательного стенда

Fig. 1. Test bench: a – graph of step-by-step loading of sliding friction pair in the running-in process, typical oscillogram of load P registration and current friction coefficient $f_{тр}$ value; б – profilogram for determining the current surface wear using the natural base method; c – test bench diagram

Для технологических процессов ТС1, включающих нанесение приработочных мягких плёнок гальваническими методами, оценивалось влияние шести факторов:

- вид предварительной обработки поверхности вала (сталь 45, HRC 45 – 48): X_1 – круглое шлифование (–) или тонкое точение композитом 10 (+);
- сила Q алмазного выглаживания (AB) после предварительной обработки: X_2 – $Q = 100$ Н (–) или $Q = 400$ Н (+);
- материал мягкого покрытия вала, получаемого гальваническим способом: X_3 – медь (A), серебро (B), олово с висмутом (C); кадмий (D);
- материал вкладыша: X_4 – алькусин-

Д (α), антифрикционный чугун АЧС-1 (β); баббит Б-88 (δ); бронза БрОЦС-5-5-5 (γ);

– величина приращения нагрузки ΔP при ступенчатом нагружении: X_5 – $\Delta P = 100$ Н (–) или $\Delta P = 200$ Н (+);

– скорость V относительного скольжения поверхностей трибоэлементов: X_6 – $V = 10$ м/мин (–) или $V = 60$ м/мин (+).

План экспериментальных исследований износостойкости соединений в рассматриваемом случае с нанесением покрытий гальваническими методами включает четыре фактора, которые варьируются на двух уровнях (X_1, X_2, X_5, X_6) и два фактора, варьируемые на четырех уровнях (X_3, X_4).

Формирование на поверхностях де-

талей (моделях валов) исследуемых соединений приработочных мягких медесодержащих плёнок фрикционным латунированием или химическим меднением осу-

$$TC2 = (O_{11} \vee O_{12} \vee \dots \vee O_{1n}) \wedge (O_{21} \vee O_{22} \vee \dots \vee O_{2n}) \wedge (O_{31} \vee O_{32} \vee \dots \vee O_{3n}). \quad (2)$$

В технологической системе TC3 комбинированной антифрикционной обработки на поверхности образцов осуществляется нанесение твёрдых нитридсодержащих покрытий (нитрида титана TiN или нитрида молибдена MoN). Логическая модель

$$TC3 = (O_{11} \vee O_{12} \vee \dots \vee O_{1n}) \wedge (O_{21} \vee O_{22} \vee \dots \vee O_{2n}) \wedge (O_{31} \vee O_{32} \vee \dots \vee O_{3n}) \wedge (O_{41} \vee O_{42} \vee \dots \vee O_{4n}). \quad (3)$$

В логических моделях (2), (3) технологические системы TC_i могут включать m технологических операций O_{mn} , каждая из которых может быть реализована различными n методами обработки. Модель (2) включает 3 технологические операции, модель (3) – 4 операции.

Для технологической системы TC2 операции O_{mn} имеют определённое технологическое назначение.

O_{1n} – предварительная обработка поверхности трибоэлемента осуществляется с целью обеспечения: а) заданной точности размеров вала; б) параметров шероховатости, обеспечивающих качественное нанесение медесодержащих материалов для формирования мягкой приработочной плёнки (например, при фрикционным латунировании шероховатость поверхности должна инициировать процесс микрорезания в контакте с латунным стержнем); в) оценки влияния факторов технологической наследственности на формирование триботехнических характеристик исследуемых соединений;

O_{2n} – нанесение приработочных мягких медесодержащих плёнок на поверхность трибоэлемента (вала), которые позволяют инициировать избирательный перенос при наличии поверхностно-активных веществ [1, 5], что повышает долговечность соединений трения скольжения;

O_{3n} – отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием (ОУО ППД) позволяет

существляется при реализации комбинированной антифрикционной обработки TC2 [3, 4], логическая модель которой представлена в следующем виде:

TC3, включающая технологические операции подготовки поверхности под нанесение покрытий, нанесение покрытий и финишную обработку поверхности, может быть представлена в следующем виде:

сформировать требуемые физико-механические свойства поверхностного слоя и профиль шероховатости поверхности, параметры которых, в свою очередь, обеспечивают требуемые эксплуатационные свойства трибоэлемента (например, износостойкость) и исключают процесс микрорезания. Также сокращается время приработки, величина начального износа в процессе приработки соединения, обеспечивается возможность технологического управления формированием требуемых триботехнических характеристик для процесса нормальной эксплуатации соединения в условиях граничного трения.

При проведении исследований технологических возможностей TC2 каждая из трех подсистем O_{mn} была реализована следующими способами.

1. Предварительная обработка O_{1n} поверхности осуществлялась тонким точением композитом 10 (O_{11}) или круглым шлифованием периферией абразивного круга (O_{12}). Выбор этих методов обработки обоснован тем, что они имеют технологические особенности формирования профиля шероховатости поверхности – индивидуальный «технологический почерк». Тонкое точение композитом 10 предпочтительнее, так как при лезвийных методах обработки исключается процесс шаржирования поверхности.

Тонкое точение поверхностей осуществлялось стандартными резцовыми вставками, оснащёнными пластинами из композита 10 со следующими геометриче-

скими характеристиками: задний угол $\alpha = 4^\circ$; главный угол в плане $\varphi = 45^\circ$; вспомогательный угол в плане $\varphi_1 = 15^\circ$; радиус при вершине $r = 0,1$ мм. Режимы точения: глубина резания $t = 0,2$ мм; скорость резания $V = 125$ м/мин, подача $S_o = 0,05$ мм/об.

Круглое шлифование осуществлялось периферией абразивного круга марки 1 400×40×20 24А 40 СТ2 6 К5 35 м/с (ГОСТ 2424-83) при скорости резания $V_{кр} = 25$ м/с; скорости вращения детали $V_d = 15$ м/мин; поперечной подаче $S_{non} = 0,02 - 0,24$ мм; количестве проходов при выхаживании $n = 4 - 6$.

2. Операция O_{2n} нанесения прирабочных медесодержащих плёнок осуществлялась методом фрикционного латунирования (O_{21}), известным как финишная антифрикционная безабразивная обработка (ФАБО) [1, 5], или химическим меднением (O_{22}). Процессы формирования прирабочной плёнки для этих способов имеет различную физическую природу (в первом случае – сочетание микрорезания при трении скольжения с процессом схватывания, а во втором – химические процессы на обрабатываемой поверхности), что может сказаться на параметрах качества поверхностей после процесса приработки и на эксплуатационных характеристиках приработанных соединений.

В процессе фрикционного латунирования с использованием глицерина в качестве поверхностно-активного вещества обработка поверхности детали латунным стержнем осуществлялась с давлением $P = 30$ МПа, скоростью $V = 20$ м/мин и подачей $S = 0,05$ мм/об. Формирование на поверхности устойчивой плёнки обеспечивалось за три прохода.

При химическом меднении на обезжиренную поверхность наносился раствор хлорной меди $CuCl_2$ в смеси с 70 %-ной уксусной кислотой и глицерином при скорости вращения детали $V = 20$ м/мин.

3. Для технологической операции O_{3n} можно назначить различные методы ОУО ППД – алмазное выглаживание (АВ), накачивание шариками и роликами (НШ и НР), электромеханическая обработка (ЭМО) и др. В процессе исследований применялось алмазное выглаживание, характеризующееся

высокой технологической гибкостью [3, 4].

Алмазное выглаживание и ФАБО осуществлялись на станке токарной группы с применением устройств упругого действия, в которые устанавливались, соответственно, инденторы с синтетическими алмазами АСПК или латунные стержни.

Реализация комбинированной антифрикционной обработки в технологической системе ТСЗ осуществлялась на основе нанесения на поверхности трибоэлементов твёрдых нитридсодержащих покрытий. Логическая модель (3) ТСЗ аналогична модели (2), но предварительная обработка поверхностей состоит из двух операций O_{1n} и O_{2n} .

Предварительная обработка на операции O_{1n} реализуется теми же двумя методами, что и в ТС2 – точением или шлифованием. При этом решаются задачи обеспечения заданной точности обработки и создаются предпосылки для возможности технологического наследования параметров качества обрабатываемой поверхности при её дальнейшей обработке.

На второй операции O_{2n} осуществляется алмазное выглаживание поверхности, обеспечивающее параметры качества поверхности детали ($Ra < 0,3$ мкм, максимальные радиусы выступов шероховатости), необходимые для нанесения качественного твёрдого нитридсодержащего износостойкого покрытия и повышения равномерности его распределения [6, 7, 8]. Выбор метода АВ обоснован наличием фактора влияния технологической наследственности на эксплуатационные свойства из-за малой толщины покрытия (5...7 мкм).

На операции O_{3n} формирование нитридсодержащих покрытий (TiN или MoN) осуществлялось методом катодно-ионной бомбардировки в вакууме (КИБ) [7, 8].

Финишная обработка поверхности нитридсодержащего покрытия алмазным выглаживанием (операция O_{4n}) обеспечивает износостойкость трибоэлемента за счёт создания микрорельефа поверхности, исключающего микрорезание вкладыша в процессе трения скольжения путём удаления с поверхности трибоэле-

мента каплевидных включений твёрдых нитридов. Выглаживание осуществляется индентором из АСПК с радиусом 3,5 мм с силой $Q \leq 150$ Н [3, 9], предотвращающей

растрескивание тонкого слоя покрытия.

На рис. 2. показан общий вид исполнения некоторых этапов обработки в технологических системах ТС2 и ТС3.

Результаты исследований и их анализ

Некоторые результаты экспериментальных исследований представлены в табл. 1.

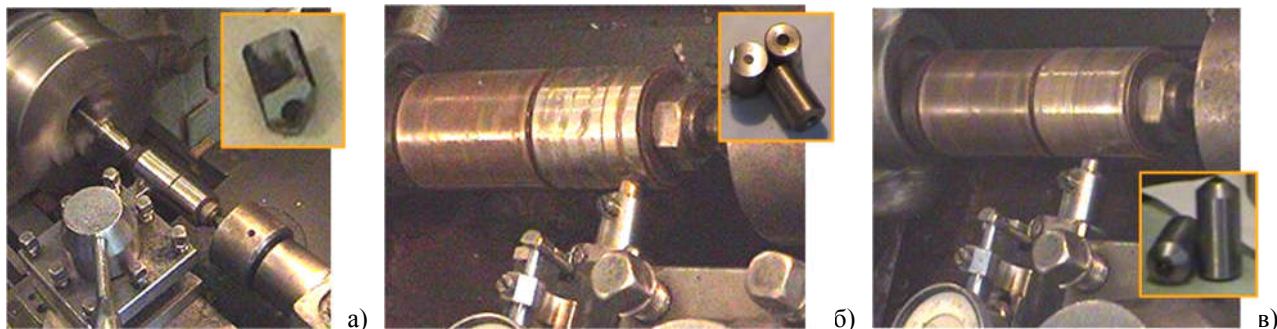


Рис. 2. Этапы обработки поверхностей трибоэлементов в ТС2 и ТС3: а – тонкое точение композитом 10 (O_{11}); б – фрикционное латунирование (O_{21}); в – алмазное выглаживание (O_{31} и O_{41})
 Fig. 2. Stages of triboelement surface treatment in TS2 and TS3: a – fine turning with composite 10 (O_{11}); b – friction brass plating (O_{21}); c – diamond burnishing (O_{31} и O_{41})

Таблица 1

Выборочные результаты исследований влияния факторов обработки поверхностей валов и режимов приработки цилиндрических соединений трения скольжения на формирование триботехнических характеристик

Table 1

Sampling study results of the influence of shaft surface treatment factors and operating modes of cylindrical sliding friction joints on the formation of tribotechnical characteristics

№ пары	Материал и вид обработки вала	Материал вкладыша	Режимы приработки		Результаты			
			ΔP , Н	V , м/мин	P_m , кН	$t_{max}/t_{уст}$, °С	f_1	f_2
1	Сталь 45 (HRC 48...50). Круглое шлифование, латунирование, АВ ($Q = 50$ Н)	Бронза ОЦС5-5-5	100	60	3,0	$\frac{65}{40}$	0,14	0,02
2	Сталь 45, нормализованная. Покрытие – TiN	Бронза ОЦС5-5-5	100	60	1,3	$\frac{125}{-}$	0,13	0,12
3	Сталь 45, нормализованная. Покрытие – TiN, АВ ($Q = 50$ Н)	Бронза ОЦС5-5-5	100	60	2,0	$\frac{116}{-}$	0,075	0,06
4	Сталь 45, нормализованная. Покрытие – MoN	Бронза ОЦС5-5-5	100	60	1,2	$\frac{115}{-}$	0,13	0,16
5	Сталь 45, нормализованная. Покрытие – MoN, АВ ($Q = 50$ Н)	Бронза ОЦС5-5-5	100	60	1,8	$\frac{118}{-}$	0,08	0,07
6	Сталь 45 (HRC 48...50). Химическое меднение	Чугун АЧС-1	50	60	1,6	$\frac{110}{-}$	0,24	0,08
7	Сталь 45 (HRC 48...50). Химическое меднение	Алькусин	100	60	5,0	$\frac{90}{35}$	0,2	0,04
8	Сталь 45 (HRC 48...50). Химическое меднение	Алькусин	50	60	4,5	$\frac{85}{35}$	0,12	0,04

Анализ результатов испытаний (табл. 1) показывает следующее.

1. Процесс приработки соединений при ступенчатом нагружении во многом зависит от технологических факторов. При принятых условиях стендовых испытаний (ΔP , V), период приработки завершается после различного числа ступеней нагружения: от $i = 3-4$ (рис. 3а) до $i = 6-11$ (рис. 3б). Это определяется различными методами обработки поверхностей деталей пар трения и скоростями их относительно скольжения в процессе приработки. При этом пары трения имеют разную грузоподъёмность P_m .

2. Применение в качестве антифрикционной обработки латунирования поверхности вала способствует повышению грузоподъёмности соединения. Так, при $\Delta P = 100$ Н и $V = 60$ м/мин (пара 1, табл. 1) грузоподъёмность P_m составляет 3,0 кН при температуре 40 °С (рис. 3а). Начало приработки происходит при температуре $t_{\max} = 65$ °С, коэффициенте трения при

этом составляет $f_1 = 0,095 \dots 0,1$. В зоне установившегося режима работы соединения коэффициент трения f_2 находится в пределах от 0,005 до 0,015, температура $t_{\text{уст}} = 40$ °С. Это косвенно свидетельствует о том, что наличие медесодержащей плёнки на поверхности вала и поверхностно-активные вещества смазки способствуют иницированию явления избирательного переноса.

Латунирование поверхности с последующим алмазным выглаживанием с силой $Q = 100$ Н обеспечивает высокую грузоподъёмность соединения ($P_m = 5,0$) и при повышенных режимах нагружения ($\Delta P = 500$ Н, рис. 3а) при температуре 40 °С. С помощью микротопографического анализа поверхностей трибоэлементов установлена живучесть в процессе приработки как приработочных мягких медесодержащих плёнок, так и твёрдых нитридсодержащих покрытий.

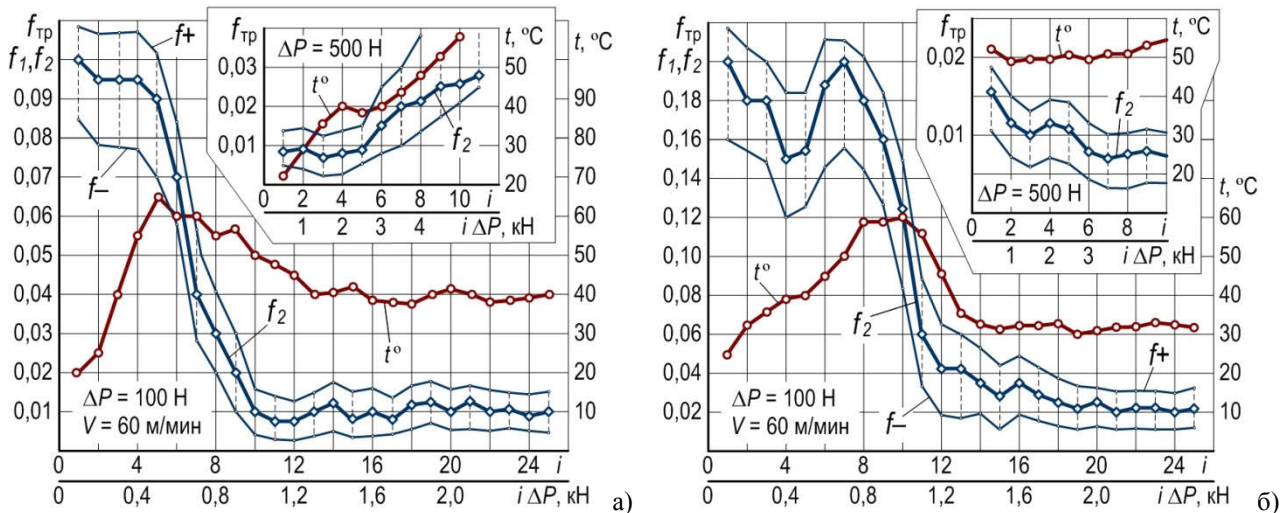


Рис. 3. Изменение триботехнических характеристик соединений пар трения скольжения в процессе приработки при ступенчатом возрастании нагрузки: а – вал латунированный с последующим алмазным выглаживанием, вкладыш из БрОЦС 5-5-5; б – вал с медесодержащим покрытием, вкладыш из алькусина;

f₋, f₊ – нижняя и верхняя границы доверительных интервалов (90%), соответственно
 Fig. 3. Changes of tribotechnical characteristics of sliding friction pair connections during the running-in process with a stepwise increase in load: a – shaft brass-plated with subsequent diamond burnishing, liner made of BrOCS 5-5-5; b – copper coated shaft, liner made of alkusin;
f₋, f₊ – lower and upper bounds of confidence intervals (90%), respectively

3. В случае комбинированной обработки в ТСЗ при отсутствии АВ твёрдого покрытия (пары 2, 4, табл. 1) с точки зрения повышения грузоподъёмности приме-

нение TiN предпочтительнее, чем применение MoN ($P_m = 1,3$ для TiN , против $P_m = 1,2$ для MoN). При этом коэффициенты трения в процессе приработки снижаются

незначительно, что объясняется сохранением микрорежущих свойств выступов шероховатости поверхности твёрдых покрытий. АВ твёрдых покрытий (пары 3, 5, табл. 1), приводит к ликвидации этих свойств микропрофилей покрытий, за счёт чего резко снижаются коэффициенты трения f_2 в соединениях к концу приработки (0,06 для TiN и 0,07 для MoN).

Также было установлено, что АВ поверхностей нитридсодержащих покрытий снижает безразмерный комплекс Крагельского-Комбалова с $\Delta = 0,5$ до $\Delta = 0,0004$, что характеризует значительное повышение износостойкости вкладыша по сравнению с другими методами обработки. Так, для принятых условий испытаний ($\Delta P = 100$ Н/мм, $V = 60$ м/мин) класс износостойкости (КИ) вкладыша из бронзы БрОЦС5-5-5, определяемый по методике [10], повысился от КИ5/5 (класс 5 / разряд 5) до КИ12/5 (класс 12 / разряд 5).

4. На грузоподъёмность соединений влияет выбор материала вкладыша. Например, грузоподъёмность пары 6 (табл. 1) с вкладышем из чугуна АЧС-1 составляет $P_m = 1,6$ кН, а для пары 8 с вкладышем из алькусина при прочих равных условиях – $P_m = 4,5$ кН. Таким образом, замена материала вкладыша из АЧС-1 на алькусин в соединениях с валами с мягкими покрытиями позволяет повысить грузоподъёмность соединений в 2,8 раза.

5. Анализ процесса приработки пары 7 (табл. 1) с медным гальваническим покрытием вала показывает (рис. 3б), что с седьмой по двенадцатую ступени i нагружения в соединении наблюдается снижение коэффициента трения f_2 с 0,2 до 0,04 и в дальнейшем до 0,02 при температуре в зоне контакта приблизительно 30 °С. В процессе дальнейшей приработки этой пары с приращением нагрузки $\Delta P = 500$ Н и при $V = 60$ м/мин наблюдается тенденция ещё большего снижения коэффициента трения f_2 до 0,007.

6. Для пар 7 и 8 (табл. 1) коэффициент грузоподъёмности K_T соединения «вал – вкладыш из алькусина», работающего в условиях граничного трения, составляет в соответствии с зависимостью (1) $K_T = 5,0/4,5 = 1,11$, что свидетельствует о бли-

зости данного технологического процесса обработки контактирующих поверхностей деталей соединений к трибологической эффективности.

В качестве предварительной обработки поверхностей валов применение тонкого точения композитом 10 является предпочтительнее по сравнению с круглым шлифованием по следующим причинам: 1) отсутствие шаржирования обрабатываемой поверхности; 2) высокая надёжность обеспечения требуемых параметров шероховатости; 3) возможность формирования после приработки поверхности с остаточными следами впадин профиля шероховатости, которые аккумулируют в себе смазку и являются своеобразными микрокарманами для сбора микрочастиц износа в процессе трения при эксплуатации. Их конфигурацией и размерами в определённых пределах можно управлять программным способом при обработке в гибких технологических системах на станках с ЧПУ [3, 9, 11, 12].

По результатам исследований строились модели формирования показателей грузоподъёмности соединений. Построению моделей предшествовал дисперсионный анализ влияния технологических факторов на формирование триботехнических характеристик путем сравнения расчётного значения F -критерия с табличными [3, 9].

Например, на грузоподъёмность пар трения, валы которых были обработаны в ТС1, с доверительной вероятностью 0,95 значимое влияние оказывают следующие факторы: сила Q алмазного выглаживания после предварительной обработки; материал покрытия поверхности вала, наносимого гальваническим способом (медь, серебро, олово с висмутом; кадмий); материал вкладыша (алькусин-Д, АЧС-1, баббит Б-88, БрОЦС-5-5-5).

Значимость факторов, учитывающих материалы покрытий вала и вкладыша, очевидно, обусловлена необходимостью учёта совместимости материалов трибоэлементов.

Вид предварительной обработки валов, значения приращений нагрузки и скорости относительного скольжения влияют на грузоподъёмность соединений слабее в

рассматриваемых пределах варьирования.

Аналогичный анализ, проведенный для соединений, поверхности валов которых подверглись комбинированной обработке в ТСЗ, показывает, что наиболее значимое влияние на грузоподъемность оказывают вид предварительной обработки вала, сила Q последующего алмазного выглаживания, материал нитридсодержа-

щего покрытия (TiN или MoN) и материал вкладыша.

Модели формирования грузоподъемности соединений получены методом множественного регрессионного анализа и имеют следующий вид:

– при нанесении мягких гальванических покрытий на поверхность вала в ТС1:

$$P_m = 2,83K_1K_2K_3 \frac{V^{0,1}}{Q^{0,15}(\Delta P)^{0,15}}, [Н]; \quad (4)$$

– при комбинированной обработке в ТСЗ:

$$P_m = 0,26K_1K_2Q_1^{0,4}Q_2^{0,01}(\Delta P)^{0,2}V^{0,02} [Н]. \quad (5)$$

В модели (4) коэффициенты K_1 , K_2 , K_3 учитывают влияние метода предварительной обработки, материала покрытия вала и материала вкладыша (табл. 2). Значение коэффициента множественной детерминации для модели (4) составляет 0,79 ($F_{расч.} = 5,65$, $F_{табл.} = 3,37$) и указывает на то, что 79 % вариации величины грузоподъемности в ходе эксперимента объяс-

няется включенными в анализ факторами.

В модели (5) коэффициент K_1 учитывает влияние метода предварительной обработки (при круглом шлифовании $K_1 = 0,85$, при тонком точении $K_1 = 2,3$), а коэффициент K_2 – влияние материала покрытия (для TiN – $K_2 = 0,85$, для MoN $K_2 = 0,72$).

Таблица 2

Коэффициенты K_1 , K_2 , K_3 модели (4) формирования грузоподъемности соединения при нанесении мягких гальванических покрытий на поверхность вала

Table 2

K_1 , K_2 , K_3 coefficients of the model (4) for forming the load capacity of the joint when applying soft electroplating coatings on the shaft surface

K_1		K_2		K_3	
Вид предварительной обработки	Значение	Материал покрытия вала	Значение	Материал вкладыша	Значение
Круглое шлифование	1,02	Медь	0,65	Алькусин	1,7
		Серебро	0,55	Чугун АЧС-1	1,25
Тонкое точение композитом 10	1,05	Олово + висмут	0,48	Баббит Б-88	1,85
		Кадмий	0,45	БрОЦС5-5-5	1,55

Модели (4) и (5) адекватны и позволяют прогнозировать величину грузоподъемности соединений при рассматриваемых методах обработки трибоэлемен-

тов, а при необходимости оценивать надёжность технологического обеспечения методом имитационного моделирования [9].

Заключение

Установлено, что на грузоподъемность цилиндрических соединений пар трения скольжения, работающих в условиях граничного трения, статистически значимое влияние оказывают конструкторские факторы, учитывающие материалы трибоэлементов (материалы вкладышей, гальванических покрытий, при-

рабочных мягких медесодержащих плёнок, твёрдых нитридсодержащих покрытий), технологические факторы, учитывающие методы и режимы обработки поверхностей и способы нанесения покрытий, а также условия приработки трибоэлементов (величина приращения нагрузки и скорость относительного

скольжения поверхностей).

Анализ результатов исследований позволяет сделать следующие частные выводы и рекомендации:

1. При эксплуатации соединений с погонными нагрузками до 200...300 Н/мм следует применять валы с покрытиями из прирабочных мягких плёнок, полученных гальваническими методами или фрикционным латунированием, а при нагрузках от 300 до 500 Н/мм целесообразно применять валы, полученные после комбинированной антифрикционной обработки на основе нанесения твёрдых нитридсодержащих покрытий.

2. Диапазон варьирования грузоподъёмности для соединений пар трения с валами с твёрдыми нитридсодержащими покрытиями составляет 5,05 кН при её максимальном значении 6,8 кН и значительно больше соответствующих показателей для соединений пар трения с валами с мягкими гальваническими покрытиями на рабочих поверхностях (3,4 кН и 3,8 кН, соответственно).

3. Установлено, что алмазное выглаживание поверхностей нитридсодержащих покрытий значительно снижает безразмерный комплекс Δ Крагельского-Комбалова от 0,5 до 0,0004, значительно повышая износостойкость вкладыша по

сравнению с другими методами обработки. Так, в принятых условиях приработки класс износостойкости (КИ) вкладыша из бронзы БрОЦС5-5-5 повысился от КИ5/5 до КИ12/5. Это подчеркивает эффективность применения алмазного выглаживания при разработке новых антифрикционных технологий.

4. При реализации комбинированной обработки поверхности вала и нанесения мягкого гальванического покрытия на поверхности вкладыша процесс приработки характеризуется более низкими значениями коэффициента трения в начале приработки и меньшими его флуктуациями. Процесс приработки требует от 3 до 5 ступеней нагружения, при этом такие соединения отличаются высокой грузоподъёмностью (до 5 кН и выше). В этом случае интенсивность изнашивания составила $I_h = 0,6 \cdot 10^{-11}$, что подтверждает высокую эффективность применения твёрдых нитридсодержащих покрытий с их последующим алмазным выглаживанием.

Полученные результаты справедливы только в областях факторных пространств, оговорённых условиями экспериментов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Суслов А.Г., Федоров В.П., Горленко О.А. 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. Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин / Е.Л. Шведков, Д. Я. Ровинский, В. Д. Зозуля, Э. Л. Браун.; отв. ред. И.М. Федорченко. Киев : Наук. думка, 1979. 188 с.
3. Федоров, В.П., Нагоркин М.Н. Принципы и средства технологического обеспечения заданных законов распределения параметров качества по обрабатываемой поверхности детали. Эффективные технологии поверхностного пластического деформирования и комбинированной обработки. Монография / под ред. А.В. Киричека. Москва : Издательский дом «Спектр», 2014. С. 172-220.
4. Суслов А.Г., Федоров В.П., Нагоркин М.Н. Инженерные методы технологического обеспечения регламентированных параметров шероховатости функциональных поверхностей деталей машин в процессе механической обработки. Научные технологии в машиностроении. 2019. № 4 (94). С. 40-48. – DOI: 10.30987/article_5c90a59824edf6.80759568
5. Гаркунов Д. Н. Триботехника (износ и безызносность). Москва : Издательство МСХА, 2001. 616 с.
6. Ройх И.А., Колтунова Л.Н. Защитные вакуумные покрытия на стали. Москва : Машиностроение, 1971. 280 с.
7. Ройх И.А., Колтунова Л.Н., Федосов С.Н. Нанесение защитных покрытий в вакууме. Москва : Машиностроение, 1976. 368 с.
8. Справочник оператора установок по нанесению покрытий в вакууме / А.И. Кострицкий, В.Ф. Карпов, М.П. Кабанченко и др. Москва : Машиностроение, 1991. 176 с.
9. Нагоркин М. Н. Параметрическая надёжность технологических систем чистовой и отделочно-упрочняющей обработки поверхностей де-

талей машин инструментами из сверхтвёрдых синтетических материалов. Монография. / Под ред. А. В. Киричека. Москва : Издательский дом «Спектр». 2017. 304 с.

10. Р 50-95-88. Рекомендации. Обеспечение износостойкости изделий. Основные положения. Москва : Изд-во стандартов. 1989. 25 с.
11. Фёдоров, В.П., Нагоркин М. Н. Технологическое обеспечение закономерного изменения качества поверхностного слоя деталей при обработке на станках с ЧПУ. Научные тех-

нологии в машиностроении. 2011. № 2 (02). С. 40-46.

12. 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. Shvedkov EL, Rovinsky DYa, Zozulya VD, Brown EL. Dictionary on friction, wear and lubrication of machine parts. Kiev: Nauk Dumka; 1979.
3. Fedorov VP, Nagorkin MN. Principles and means of technological support for the specified laws of distributing quality parameters over the workpiece surface. Effective technologies of surface plastic deformation and combined machining: monograph. Moscow: Publishing House "Spectr"; 2014.
4. Suslov AG, Fedorov VP, Nagorkin MN. Engineering methods for technological support of regulated roughness parameters of machinery operation surfaces during machining. Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering. 2019;4(94):40-48. DOI: 10.30987/article_5c90a59824edf6.80759568
5. Garkunov DN. Tribotechnics (wear and tear). Moscow: Publishing House of the Ministry of Agriculture; 2001.
6. Roikh IA, Koltunova LN. Protective vacuum coatings on steel. Moscow: Mashinostroenie; 1971.

7. Roikh IA, Koltunova LN, Fedosov SN. Application of protective coatings in vacuum. Moscow: Mashinostroenie; 1976.
8. Kostrzhitsky AI, Karpov VF, Kabanenko MP. Handbook of the operator of installations for coating in vacuum. Moscow: Mashinostroenie; 1991.
9. Nagorkin MN. Parametric reliability of technological systems for finishing and hardening treatment of machine part surfaces with tools made of superhard synthetic materials: monograph. Moscow: Publishing house "Spectr"; 2017.
10. R 50-95-88. Recommendations. Ensuring the wear resistance of products. Main provisions. Moscow: Publishing House of Standards; 1989.
11. Fedorov VP, Nagorkin MN. Technological support for a regular change in the quality of the surface layer of parts during CNC machining. Intensive Technologies in Mechanical Engineering. 2011;2(02):40-46.
12. 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 – профессор, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения» Брянского государственного технического университета, e-mail: fedorvlad44@mail.ru; Author-ID-РИНЦ: 694695, тел. +7-980-315-77-09.

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

Вайнер Леонид Григорьевич – доцент, доктор технических наук, и. о. заведующего кафедрой «Двигатели внутреннего сгорания» Тихоокеан-

ского государственного университета, профессор кафедры «Транспортно-технологические комплексы» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (совм.), почетный работник высшего профессионального образования РФ, lgvainer@mail.ru, Scopus-Author ID: 7004052035, Author-ID-РИНЦ: 119940, тел. 8-914-541-51-49.

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

Fedorov Vladimir Pavlovich - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology at Bryansk State Technical University, e-mail: fedorvlad44@mail.ru; Author-ID-RSCI: 694695, phone: 8-980-315-77-09.

Nagorkin Maksim Nikolaevich - Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Technosphere Safety at Bryansk State Technical University, e-mail: nagorkin@tu-bryansk.ru; Author-ID- RSCI: 391768, phone: 8-960-552-61-25.

Vayner Leonid Grigoryevich, Associate Professor, Doctor of Technical Sciences, Acting Head of the Department of Internal Combustion Engines at the

Pacific National University, Professor of the Department of Transport and Technological Complexes at Far Eastern State Transport University, Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation, Igvainer@mail.ru, Scopus-Author ID: 7004052035, Author-ID-RSCI: 119940, phone: 8-914-541-51-49.

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

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 12.06.2024; одобрена после рецензирования 18.06.2024; принята к публикации 26.07.2024. 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 12.06.2024; approved after review on 18.06.2024; accepted for publication on 26.07.2024. 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*.