

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. №11 (173). С.3-17.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. №11 (173). P.3-17.

Научная статья
УДК 669.35.5:621.793
doi: 10.30987/2223-4608-2025-11-3-17

Исследование механизма формирования структуры и свойств газодинамических покрытий на основе меди

Лидия Ивановна Куксенова¹, д.т.н.
Владимир Евгеньевич Архипов², к.т.н.
Максим Сергеевич Пугачев³, н.с.
Дмитрий Александрович Козлов⁴, к.т.н.

^{1, 2, 3, 4} Институт Машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

¹ lkuc@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-9207-6587>

² vearkhipov@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-8106-1408>

³ pugachevmax@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9159-8831>

⁴ kozlov74@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7701-7300>

Аннотация. Представлены результаты исследования структурно-фазового состояния, состава и трибологических свойств покрытий на основе меди, полученных методом газодинамического напыления, и их связь с механизмом формирования эксплуатационных свойств. Покрытие на образце из стали 40Х наносилось с помощью установки ДИ-МЕТ-404 при скорости перемещения сопла относительно образца 10 мм/с и расстояния от сопла до поверхности, равном 10 мм. Триботехнические испытания проводили при реверсивном трении скольжения, относящемся к тяжелым условиям испытаний с точки зрения деформации материала поверхностных слоев. Показано, что механизм формирования структуры и трибологических свойств газодинамических покрытий состава (Cu + Al₂O₃), (Zn + Al₂O₃), (Cu + Zn + Al₂O₃) соответствует закономерностям формирования комплекса свойств гетерофазных структур, представляющих собой композиционные материалы, состоящие из двух или более фаз с существенно различающимися характеристиками механических свойств. Результаты триботехнических испытаний газодинамических покрытий при сухом трении, в условиях фреттинга и при граничной смазке показали высокую износостойкость материалов покрытий, соизмеримую с ее показателями, когда реализуется режим практической безызносности (явление избирательного переноса при трении). С позиций соотношения характеристик механических свойств структурных составляющих материала покрытия и их роли при формировании фактической площади контакта в условиях скользящей пары трения описаны представления о механизме формирования пленок фрикционного массопереноса. Отмечается, что нанесение покрытий методом напыления на изделия не просто улучшает свойства конструкционных материалов, из которых они изготовлены, а приводит к образованию нового композиционного материала с присущим ему комплексом свойств, который должен учитываться при разработке конструкций машин и механизмов.

Ключевые слова: газодинамическое напыление, медные сплавы, структура, фазовый и химический состав, трибологические свойства, фрикционный массоперенос

Для цитирования: Куксенова Л.И., Архипов В.Е., Пугачев М.С., Козлов Д.А. Исследование механизма формирования структуры и свойств газодинамических покрытий на основе меди // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 11 (173). С. 3–17. doi: 10.30987/2223-4608-2025-11-3-17

Investigation of structure and properties formation mechanism for copper-based gas dynamic coatings

Lidiya I. Kuksenova¹, D. Eng.
Vladimir E. Arkhipov², PhD Eng.
Maxim S. Pugachev³, RF
Dmitry A. Kozlov⁴, PhD Eng.

^{1, 2, 3, 4} Mechanical Engineering Institute named after A.A. Blagonravov RAS, Moscow, Russia

¹lkukc@mail.ru

²vearkhipov@mail.ru

³pugachevmax@mail.ru

⁴kozlov74@mail.ru

Abstract. The research results of the structural and phase state, composition, and tribological properties of copper-based coatings obtained by gas-dynamic spraying and their relationship to the mechanism of formation of operational properties are presented. The coating on the 40X steel (structural alloy steel) sample was applied using a DIMET-404 installation at a nozzle displacement velocity relative to the sample of 10 mm/s and a distance from the nozzle to the surface of 10 mm. Tribotechnical tests were carried out with reversible sliding friction, which may be viewed as severe test conditions in terms of the material surface layers deformation. It is shown that the mechanism of structure and tribological properties formation for gas-dynamic coatings of the compositions (Cu + Al₂O₃), (Zn + Al₂O₃), (Cu + Zn + Al₂O₃) corresponds to the patterns of formation of a complex of properties of heterophase structures, which are composite materials consisting of two or more phases having significantly different characteristics of mechanical properties. The results of tribotechnical tests of gas-dynamic coatings under Coulomb friction, under fretting conditions and boundary lubrication have shown high wear resistance of coating materials, commensurate with its performance when the practical wear-free regime is implemented (the phenomenon of selective transfer during friction). Taking into account the ratio of the characteristics of the mechanical properties of coating material structural components and their significance in the formation of the actual contact area under conditions of a sliding friction pair, the ideas about the mechanism of formation of frictional mass transfer films are described. It is noted that building by spraying does improve the properties of the structural materials and besides it, it contributes to the formation of a new composite material with its inherent set of such useful properties that must be taken into account when designing machinery and mechanisms.

Keywords: gas-dynamic spray application, copper alloys, structure, phase and chemical composition, tribological properties, frictional mass transfer

For citation: Kukseniva L.I., Arkhipov V.E., Pugachev M.S., Kozlov D.A. Investigation of structure and properties formation mechanism for copper-based gas dynamic coatings / Science intensive technology in mechanical engineering. 2025. № 11 (173). P. 3–17. doi: 10.30987/2223-4608-2025-11-3-17

Введение

Успешное решение одной из важных задач машиностроения – повышение эксплуатационных свойств (надежности, долговечности и безопасности) машин и механизмов тесно связано с проблемой износостойкости конструкционных материалов. Нанесение износостойких и антифрикционных покрытий на активно изнашивающиеся поверхности трения является перспективным направлением в решении этой задачи. Известно множество разнообразных технологий нанесения покрытий, которые условно делятся на несколько групп: термические методы, оказывающие тепловое воздействие; термомеханические методы, сочетающие нагрев и механическое воздействие

на обрабатываемое изделие; адгезионные методы, при которых взаимодействие материала покрытия с обрабатываемой поверхностью протекает в результате физической и химической адсорбции.

Нанесение покрытий на изделия не просто улучшает свойства конструкционных материалов, из которых они изготовлены, а приводит к образованию нового композиционного материала с присущим ему комплексом свойств, который должен учитываться при разработке конструкций машин и механизмов. В связи с тем, что допускаемый износ деталей машин мал (обычно не более нескольких десятых долей миллиметра), толщина поверхностного слоя с заданным комплексом триботехнических свойств может быть небольшой.

Среди распространенных методов нанесения покрытий, имеющих триботехническое назначение, можно отметить следующие. Методы химического осаждения из газовой фазы (или газофазные методы), основанные на осаждении покрытий на нагретую подложку в результате разложения газообразных веществ с образованием на поверхности слоя химического соединения. В частности, такие покрытия в несколько раз повышают стойкость инструмента из твердых сплавов.

Широко применяются покрытия, получаемые термовакуумным напылением. Этот метод основан на конденсации на поверхностях деталей пленки металла или химического соединения, переведенного в парообразное состояние нагревом наносимого вещества. Для образования покрытия с хорошей адгезией к основе требуется нагревать ее до температур, обеспечивающих прохождение диффузионных процессов на границе покрытие – основа. Поэтому для образования качественного покрытия при более низких температурах деталей необходимо повысить энергию конденсирующихся на них частиц. В этом случае применяются вакуумные ионно-плазменные покрытия. Эти методы (например, катодное, реактивное, магнетронное распыление и др.) позволяют наносить тугоплавкие и недостаточно стабильные соединения с сохранением их стехиометрического состава, нанесение которых термовакуумными методами невозможно.

Газотермические методы – газоплазменные и электродуговая металлизация – хорошо известны и также достаточно широко применяются в триботехнической практике. Эти методы являются одним из наиболее перспективных направлений порошковой металлургии. Практика показывает, что сопротивление износу и коррозии деталей из обычных конструкционных материалов может быть многократно увеличено при незначительном расходе порошковых материалов.

Распространенным методом модификации поверхности изделий является также гальваническое нанесение покрытий из металлов, сплавов и композиционных материалов. Введение в состав покрытий на основе хрома, железа и никеля частиц других материалов существенно повышает их триботехнические свойства. Введение порошков карбидов, оксидов,

боридов, алмаза позволяет существенно повысить износостойкость покрытий; введение халькогенидов, графита, полимеров – антифрикционность покрытий.

Детальные исследования деформационных и диффузионных процессов в зоне деформации покрытий и выявление их роли в условиях трения и изнашивания нагруженных сопряжений позволили сформулировать конкретные условия эксплуатации изделий с покрытиями для машиностроительной практики [1, 2].

Состав покрытий, формируемых различными методами, имеет широкий спектр, но особую роль в них, как показывает триботехническая практика, отводится сплавам на основе меди. Сплавы меди с цинком (латуни) и оловом (бронзы) широко используются для изготовления подшипников трения скольжения, для антифрикционных узлов деталей поршневых компрессоров, колец торцовых уплотнителей, массивных червячных винтов, втулок, вкладышей, работающих в тяжёлых условиях трения.

Применение меди и медных сплавов в качестве антифрикционных материалов и покрытий обусловлено тем, что в зоне контакта они способны реализовать правило положительного градиента механических свойств по нормали к поверхности трения – необходимого условия внешнего трения [3]. Поэтому области применения сплавов на основе меди для триботехнических целей постоянно расширяются. Например, распространено применение меди в композитных материалах триботехнического назначения. Покрытия меди, созданные методом гальванического осаждения, обеспечивают снижение потерь на трение и износ пар скольжения. Распространение получила финишная антифрикционная безабразивная обработка, которая заключается в нанесении на поверхности трения стальных и чугуновых деталей тонкого слоя мягкого металла (меди, латуни, бронзы) для придания материалам высоких антифрикционных свойств и повышения долговечности пар трения. Известна практика применения меди в качестве легирующего элемента в покрытиях, полученных направленным высокоэнергетическим воздействием, в частности, лазерной обработкой, электроискровым легированием [4].

Среди разнообразия методов направленного изменения свойств поверхности изделий машиностроения в настоящее время особое место занимает интенсивно развивающийся метод газодинамического напыления [5, 6]. Он позволяет наносить функциональные покрытия на локальные участки и значительные площади поверхности деталей в заводских и полевых условиях при минимальном разогреве подложки. Метод основан на введении в нагретый поток воздуха, истекающего из сопла распылителя со скоростью выше скорости звука, механической смеси частиц металлов и химического соединения – твёрдого и хрупкого оксида алюминия (корунда), при соударении с которым металлы деформируются, уплотняются, и за счёт этого повышается когезионная прочность нанесённого слоя (когезия) и прочность сцепления с подложкой (адгезия). Свойства покрытий существенно зависят от механических свойств металлов и температуры напыления и, например, для покрытия меди адгезия достигает 50...55 МПа и когезионная прочность находится в пределах 80...140 МПа [6].

В основе процесса газодинамического напыления и формирования реального покрытия лежит пластическая деформация составляющих порошкового материала без значимого влияния на свойства поверхности обрабатываемого твердого тела. Развитие пластической деформации в частицах меди или медного сплава в процессе формирования покрытия связано с особенностями структурно-фазовых превращений в них, что требует проведения исследований и анализа состояния и состава покрытий с выявлением тех факторов, которые могут оказывать влияние на триботехнические характеристики сопряжений скольжения – одного из перспективных направлений практического применения этого метода обработки изделий в машиностроении.

В данной работе рассмотрено обобщение результатов исследования структурного состояния газодинамического медного покрытия на поверхности стали и сформулированы представления о механизме организации триботехнических свойств в зоне контактного взаимодействия при испытаниях пар трения скольжения.

Материалы и методики исследования

Покрытие на образец из стали 40Х наносилось с помощью установки ДИМЕТ–404 при скорости перемещения сопла относительно образца 10 мм/с и расстояния от сопла до поверхности, равном 10 мм. Применяли три состава металлических частиц: 1 – меди и корунда в соотношении 55:45 (масс %); 2 – цинка и корунда в соотношении 55:45 (% масс.); 3 – меди, цинка и корунда в соотношении 35:35:30 (% масс.) при температуре потока воздуха 270, 360, 450 °С.

Фазовый состав покрытий исследовали на дифрактометре Rigaku Ultima IV. Рентгенофлуоресцентный анализ осуществляли на спектрометре Rigaku PrimusII с использованием трубки с Rh-анодом, в вакууме и диапазоне элементов от Ca до U. Изучение морфологии и элементного состава покрытия проводили на сканирующем электронном микроскопе FEI «Quanta-650» с энергодисперсионным рентгеноспектральным анализатором EDAX.

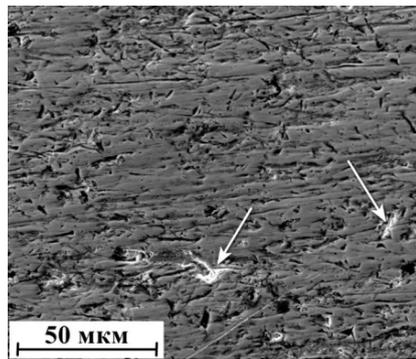
Описанные примеры результатов триботехнических испытаний проводили при реверсивном трении, относящемся к тяжелым условиям испытаний с точки зрения деформации поверхностных слоев. Исследование триботехнических характеристик, связанных с контактной деформацией в условиях возвратно-поступательного скольжения, позволяет более ярко выявлять роль структурообразования в процессе трения и его влияния на уровень поверхностного разрушения покрытия.

Результаты исследований

Рассмотрим особенности структурообразования и формоизменения покрытия в процессе технологической обработки, которые играют важную роль в формировании триботехнических свойств газодинамического покрытия в условиях контактной деформации при трении скольжения.

Микрофотография поверхности покрытия на основе смеси частиц меди и корунда, нанесённого при температуре 360 °С представлена на рис. 1. Видно, что покрытие имеет достаточно монолитный характер с рельефом,

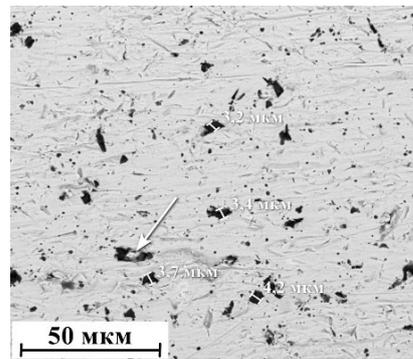
возникшим за счёт устранения хрупких оксидных плёнок по границам частиц металлов. Наблюдаемые замкнутые полости (углубления) разной формы и протяжённости формируются в процессе напыления (служат в качестве индикатора наличия пористости в покрытии), а также в результате удаления частичек корунда при механической обработке поверхности.



а)

Они значительно отличаются по размеру, их средняя величина составляет ~ 2 мкм.

Микрофотографии четко фиксируют также частицы корунда разной формы и размера и их тонкие фрагменты, размер которых не превышает 5 мкм. Есть основания полагать, что частицы корунда закреплены в медной основе, а фрагменты частиц корунда – в порах.



б)

Рис. 1. Микрофотографии покрытия на основе меди:

а – изображение во вторичных электронах; б – в отраженных электронах

Fig. 1. Micrographs of copper-based coatings:

a – image in secondary electrons; b – in reflected electrons

В девяти хаотично расположенных точках поверхности покрытия меди (визуально не содержащих частиц корунда) был проведён микрорентгеноспектральный анализ. На основе величин интенсивности импульсов спектра меди и алюминия была оценена площадь, занимаемая частицами корунда. Она составляет величину $\approx 0,05 \text{ мкм}^2$ (по диаметру зондирования $\sim 2 \text{ мкм}$ и глубине возбуждения спектров $1 \dots 2 \text{ мкм}$).

Массовое содержание алюминия в покрытии в разных точках составляет, %: 1,87; 0,54; 0,49; 0,23; 0,19; 0,17; 0,17; 0,16; 0,09. Следовательно, распределение частиц корунда по площади покрытия меди существенно неравномерно, и от точки к точке может отличаться в ~ 21 раз. Но при этом частицы корунда достаточно прочно закреплены в матрице и не удаляются при шлифовании – финишной обработке покрытия.

Значимой характеристикой свойств покрытия с трибологической точки зрения является твердость. Технически чистая медь имеет твердость $\sim 850 \text{ МПа}$, твердость покрытия меди с корундом после напыления при

температурах 180, 360 и 540 °C составляет 1445, 1150 и 1100 МПа [7]. Корунд относится к группе твердых минералов. По величине твердости он уступает только алмазу (по шкале Мооса твердость алмаза составляет 10 ед., корунда – 9, что соответствует числу истинной твердости $\sim 100000 \text{ МПа}$ и $\sim 21000 \text{ МПа}$ соответственно).

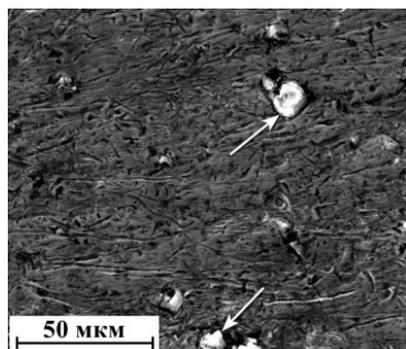
Таким образом, рассматриваемое покрытие содержит мягкую структурную составляющую (медь) и твердые включения (Al_2O_3), хаотично распределенные по объему. Такое структурное состояние соответствует основному правилу расположения структурных фаз в сплаве, обеспечивающих его высокие антифрикционные свойства и износостойкость (принцип Шарпи) [8], а при наличии открытой пористости усиливается эффект смазочного действия, что в совокупности повышает качество работы пары трения скольжения, в состав которого входит газодинамическое покрытие.

Также, как и для медного покрытия, в девяти хаотично расположенных точках поверхности цинкового покрытия был проведён микрорентгеноспектральный анализ. На

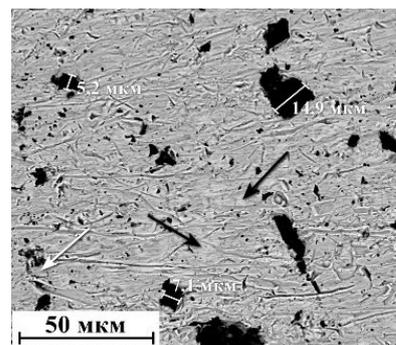
основе величин интенсивности импульсов спектра цинка и алюминия была оценена площадь, занимаемая частицами корунда. Микро-рентгеноспектральный анализ состава покрытия на основе частиц цинка показывает, что содержание алюминия (Al_2O_3) существенно отличается от результатов, полученных при исследовании покрытия на основе меди. Массовое содержание алюминия в разных точках покрытия (в порядке убывания) составляет, %: 63,74; 18,13; 15,94; 7,54; 6,21; 5,58; 5,55; 5,31; 3,01 (относительная разница значений также, как и для покрытия меди, составляет ~ 21 раз). Такой разброс по величинам интенсивности линий спектра алюминия свидетельствует о существенном отличии размеров частиц корунда и его количестве в исследуемом объеме покрытия. Рассчитывая пропорциональную зависимость интенсивности спектра металлов от площади поверхности (объёма), получаем, что величина частицы корунда занимают площадь, не превышающую $0,544 \text{ мкм}^2$. Таким образом, можно полагать, что условная частица корунда в покрытии на основе цинка, по крайней мере, на порядок больше таковой в покрытии меди, и кроме того, степень закрепления частиц корунда или его фрагментов в покрытии цинка существенно ниже, что может влиять на процессе фрикционного массопереноса.

Следовательно, структура цинкового покрытия, полученного газодинамическим методом, также, как и покрытие меди, относится к структуре с высокими антифрикционными свойствами: она содержит твердые включения в более мягкой матрице [9]. Такое структурно-фазовое состояние удовлетворяет требованиям подшипниковых материалов: давление передается на твердые включения (частицы Al_2O_3), обеспечивающие невысокий коэффициент трения и не вызывающие задира на сопряженной поверхности; пластичность матрицы (цинка) в условиях повышенных температур в зоне фактического контакта при трении позволяет сопряженному телу принять форму основного образца, исключив тем самым локальные участки, испытывающие высокие контактные давления и формирование задира. Кроме того, благодаря невысокой температуре плавления цинка ($\sim 420 \text{ }^\circ\text{C}$), происходит более эффективный процесс приработки (сокращается время приработки и потери на износ до достижения установившегося режима трения), достигается равновесная шероховатость [10].

Микрофотографии покрытия, полученного на основе смеси меди, цинка и корунда приведены на рис. 2.



a)



b)

Рис. 2. Микрофотографии покрытия $Cu-Zn-Al_2O_3$:
a – во вторичных электронах; б – в отраженных электронах

Fig. 2. Micrographs of the $Si-Zn-Al_2O_3$ coating:
a – in secondary electrons; b – in reflected electrons

Можно видеть качественную аналогию микроструктуры покрытий, состоящих из смеси меди с корундом и меди с цинком и корундом, рис. 1 и 2. Однако наблюдается несколько значимых для трибологических

свойств отличий. Во-первых, поры в медно-цинковом покрытии имеют значительно больший размер по сравнению с порами в медном покрытии. Во-вторых, больше присутствует крупных частиц корунда (рис. 2, a). В медно-

цинковом покрытии, в отличие от покрытия меди, формируется более выраженная неоднородность по размерам частиц корунда. При этом между разноразмерными частицами корунда и матрицей создается некоторый разрыв – зазор, что косвенно указывает на менее прочное закрепление корунда в покрытии.

Важной особенностью процесса формирования покрытия тройного состава (Cu, Zn, Al₂O₃) от двойных (Cu, Al₂O₃ и Zn, Al₂O₃)

является модификация частиц цинка за счёт диффузии меди, в результате чего формируются фазы, характерные для латуней разного состава [11]. При этом содержание цинка, меди и новых структурных составляющих в покрытии зависит от температуры и продолжительности напыления (количества циклов), что связано с энергетическими особенностями метода газодинамического напыления, табл.1.

1. Состав медно-цинкового покрытия

1. Copper-zinc coating composition

Температура напыления, °С	Количество циклов	Химические элементы, ат. %		Фазы в соответствии с диаграммой состояния Cu-Zn
		Cu	Zn	
270	3	91,7	8,15	α
	5	82,08	17,38	α
360	3	77,50	22,30	α
	5	69,03	30,42	α
450	2	62,20	37,60	α
	5	53,8	45,40	α + β'

Следует подчеркнуть, что формирование структуры покрытия при его напылении определяется не только диффузионным перераспределением меди, но и перемещением частиц твердой фазы (корунда и его фрагментов) в процессе финишной обработки. Основываясь на результатах рентгеноспектрального анализа, проведённого по трассе, начинающейся на частице меди, проходящей по частице

цинка и заканчивающейся на частице меди (трасса представляет собой частицы Cu-Zn-Cu), рис. 3, рис. 4, можно качественно описать последовательность структурно-фазовых диффузионных процессов при формировании покрытия, а также высказать представления о механизме миграции частиц корунда в процессе контактного взаимодействия и их роли при трении и фрикционном массопереносе.

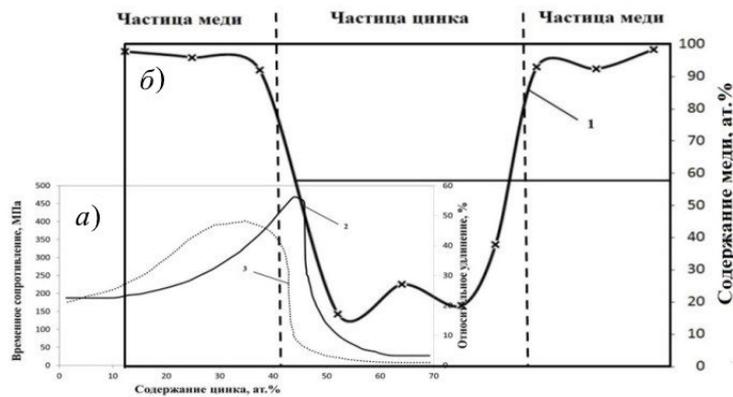


Рис. 3. Зависимость прочности (2) и пластичности (3) латуней от содержания цинка (а) и изменение концентрации меди (1) в частице цинка (б)

Fig. 3. Dependence of strength (2) and ductility (3) of brass on zinc content (а) and change in copper concentration (1) in zinc particle (б)

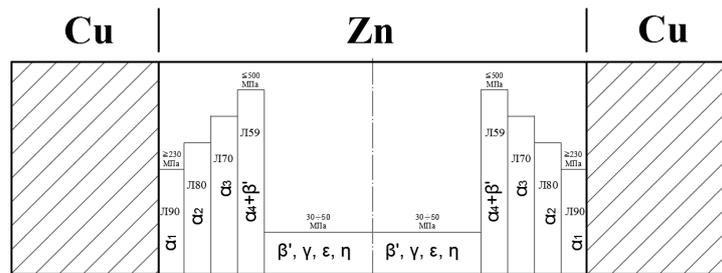


Рис. 4. Схема фазовых составляющих по трассе Cu-Zn-Cu при газодинамическом напылении и характеристики механических свойств

Fig. 4. Diagram of phase components along the Si-Zn-Cu path during gas dynamic spraying and characteristics of mechanical properties

На первом участке, рис. 3 кривая 1, рис. 4, концентрация меди снижается от 100 % до ≈ 95 % и затем резко падает до точки перегиба, где ее массовая доля составляет ≈ 60 %. В соответствии с диаграммой состояния Cu-Zn рассмотренную область следует отнести к α -твёрдому раствору Cu-Zn, а ближе к содержанию меди 60 % – к области существования α -фазы и β' -твёрдого раствора электронного типа на базе Cu-Zn. С увеличением трассы сканирования по частице цинка и приближении к частице меди ее концентрация повышается до ≈ 90 %, что соответствует α -твёрдому раствору Cu-Zn.

Учитывая особенности диффузии элементов, соотношение характеристик механических свойств структурных составляющих, а также составляющих порошковой смеси, можно представить следующие характерные особенности механизма формирования покрытия и взаимного расположения его структурных составляющих. Мелкие частицы корунда, прочно закреплённые в частицах меди, в процессе контактной деформации способны эффективно занимать дефекты (полости), которые создаются крупными частицами корунда, повышая микрогеометрические характеристики поверхности трения медно-цинкового покрытия. Крупные частицы корунда, слабо закреплённые в частицах цинка, рис. 2, оторвавшиеся от поверхности напылённого слоя, перемещаясь по поверхности медно-цинкового покрытия, могут встретиться с частицами меди, чистого и модифицированного цинка, деформируя или разрушая их. Так как предел прочности меди составляет 210...220 МПа, при пластичности 38 %, а цинка 120 МПа при пластичности 22 %, то можно допустить, что частицы

меди и цинка не способны остановить перемещение твёрдой частицы корунда. Но в контакте с модифицированными в результате диффузии меди частицами цинка, которые имеют переменный состав и механические характеристики, частицы оксида алюминия могут тормозиться за счет увеличения сопротивления перемещению, так как прочность цинка меняется в зависимости от содержания компонентов (меди, цинка) и может возрасти до 300 МПа, что соответствует латуни марки Л90, Л80. При смещении частицы оксида далее к центру модифицированной частицы цинка с увеличением содержания цинка и уменьшением содержания меди предел прочности возрастает до 400...450 МПа, как для латуней марки Л63, Л59 [12] (рис. 3, 4). Эта зона незначительна по толщине и может существенно затормозить частицу корунда, но вероятность задержать ее достаточно мала. Преодолев это незначительное по величине препятствие, частица корунда попадает в область с содержанием меди 8...10 %, прочность которой составляет 30...50 МПа и разрушает её, тем самым, попадая «в карман» (рис. 4). Так как далее за этой областью опять возникает участок частицы модифицированного медью цинка прочностью 400...450 МПа, то эта частица не будет иметь возможность перемещаться далее и нарушать целостность покрытия.

Таким образом, при газодинамическом напылении порошка, состоящего из смеси меди, цинка и корунда, происходит два основных процесса, принципиально важных с точки зрения формирования износостойкой структуры. Во-первых, в условиях высокоскоростного ударного контакта частиц реализуются процессы диффузионного взаимодействия металлов (Cu и Zn) и

образования фаз, присущих латуням. Изменяя режимы напыления, можно получать в структуре покрытия преимущественно одну фазу типа α -твердого раствора или другие сочетания фаз (в соответствии с диаграммой металлического состояния Cu-Zn), которые отвечают требованиям по характеристикам механических свойств и заданным условиям эксплуатации узлов трения. Во-вторых, формируется гетерофазная структура, состоящая из относительно мягких фаз на основе меди и цинка и твердой фазы корунда, хаотично распределенного по объему покрытия. Такое структурное состояние металлического материала относится к типу износостойких гетерофазных структур. Твердые включения не только воспринимают и перераспределяют высокие локальные давления на поверхности трения, но создают характерный микрорельеф на поверхности контакта, способствующий удержанию смазочного материала в зоне трения.

Следовательно, метод газодинамического напыления порошковых смесей, состоящих из частиц (Cu и Al₂O₃), (Zn и Al₂O₃), (Cu, Zn и Al₂O₃), позволяет формировать покрытия, структурно-фазовое состояние которых отвечает правилу Шарпи и относится к гетерофазным износостойким структурам [13].

Испытания в условиях трения без смазочного материала. По схеме палец-диск

испытывалась покрытие меди при трении по стали ШХ15 при скорости скольжения 1 м/с и давлении 0,2 МПа. Проводили сравнительные испытания износостойкости медного газодинамического покрытия с износостойкостью монокристаллических образцов из латуни Л68 [14]. Показано, что на достаточно большом пути трения (~ 24 км) интенсивность изнашивания покрытия меди, нанесенного при 270 °С, составляет ~ 5,3·10⁻¹⁰, образцы латуни Л68 показывают практически такое же значение интенсивности износа

(разница соответствует пределу точности эксперимента). При этом покрытие меди, полученное при 450 °С напыления, показало более низкое значение интенсивности изнашивания (~ 4,5·10⁻¹⁰).

С помощью модельного трибосопряжения, состоящего из кольцевого стального образца (ЭП302М) и стальной пластины (контртела) с напыленным покрытием, по схеме линейного контакта цилиндр – плоскость в условиях возвратно-поступательного движения (амплитуда колебаний 0,5 мм, частота 30 Гц, нормальная нагрузка 10 Н) без смазочного материала проводили сравнительные триботехнические испытания (при фреттинге) двух покрытий: (Cu, Al₂O₃) и (Cu, Zn, Al₂O₃), напыленных при температуре 450 °С. Основные результаты экспериментов приведены в табл. 2.

2. Результаты сравнительных испытаний [15]

2. Results of comparative tests [15]

Параметры	Контртелo с покрытием				Кольцо из стали ЭП302М			
	Материал покрытия контртела							
	Cu + Al ₂ O ₃		Cu + Zn + Al ₂ O ₃		Cu + Al ₂ O ₃		Cu + Zn + Al ₂ O ₃	
	Прира- ботка	Установив- шийся режим	Прира- ботка	Установив- шийся режим	Прира- ботка	Установив- шийся режим	Прира- ботка	Устанвив- шийся режим
Путь трения, км	0,6	4,5	0,2	1,3	0,2	1,3	0,2	1,3
Износ, мкм	120	166	25	12	23	20	0	0
Коэф. трения	-	0,6	0,56	0,88	-	0,6	0,56	0,88
Контактное давление, МПа	0,8	0,6	2,1	5,9	0,8	0,6	2,1	5,9
Интенсивность износа, 10 ⁻⁸	19	1,0	12	1,0	11	1,5	0	0

Результаты исследования состояния образца с покрытием (контртела) и оценки триботехнических характеристик в период приработки и испытаний в установившемся режиме показали, что работоспособность пары трения с медно-цинковым покрытием имеет явные преимущества для условий фреттинга, табл. 2. Кроме того, при раскрытии пары трения и в результате анализа сравнительных данных, приведенных в табл. 2, установлено, что в процессе трения кольца по пластине с напыленным покрытием в нормальных условиях без смазочного материала имеет место фрикционный массоперенос материала покрытия на кольцо [15].

Фрикционный массоперенос материала покрытия подтвержден результатами микро-рентгеноспектрального анализа поверхности кольца после испытаний в паре с покрытием меди, нанесенным при 450 °С, рис. 5. Видно, что интенсивность переноса меди при

приработке (период приработки составляет 1 ч) максимальна, содержание меди достигает величины ~ 76 %. Когда пара достигает установившегося режима трения (время испытаний 6 ч) количество меди на поверхности кольца снижается до ~ 20 %, что может быть связано с обратным переносом металла покрытия на сопряженную поверхность, о чем свидетельствуют величины интенсивности изнашивания.

Микро-рентгеноспектральный анализ поверхности кольца, испытанного в паре с медно-цинковым покрытием, нанесенным также при 450 °С, показывает, что в режиме приработки содержание меди составляет 42 %, цинка 31 %. Следует особо подчеркнуть, что концентрация фрикционно перенесенных меди и цинка на сопряженную при трении поверхность коррелирует с содержанием их в исходном состоянии, которое составляет 53,8 % и 45,4 %, табл. 1.

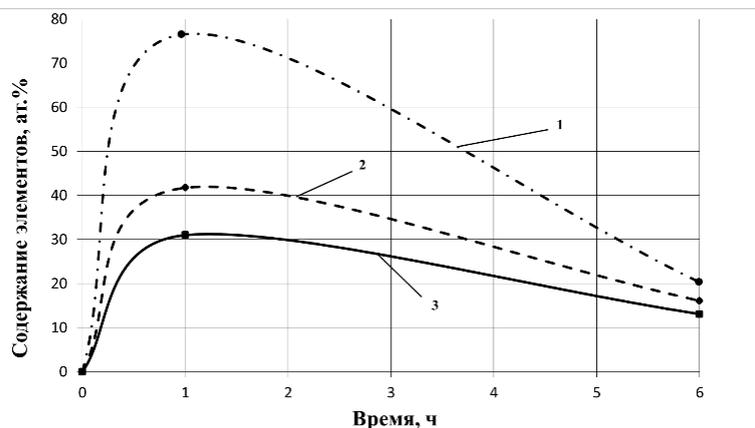


Рис. 5. Кинетика фрикционного массопереноса:

1 – покрытие (Cu + Al₂O₃), изменение концентрации меди; 2, 3 – покрытие (Cu + Zn + Al₂O₃), 2 – концентрация меди, 3 – концентрация цинка

Fig. 5. Kinetics of frictional mass transfer:

1 – coating (Cu + Al₂O₃), change in copper concentration; 2, 3 – coating (Cu + Zn + Al₂O₃), 2 – copper concentration, 3 – zinc concentration

Суммарное количество перенесенных меди и цинка составляет 73 %, что незначительно отличается от массы меди (76 %) перенесенной из покрытия (Cu + Al₂O₃), рис. 5. Эти характерные особенности фрикционного массопереноса указывают на механический процесс переноса материала покрытия в процессе нагруженного контактного взаимодействия.

На машине возвратно-поступательного движения в среде индустриального масла И-20А и пластичного смазочного материала Литол-24 при средней скорости скольжения 0,19 м/с испытывалась пара трения сталь ШХ15 с покрытием (Cu + Al₂O₃), напыленным при 270 и 450 °С, по стали ШХ15 в условиях ступенчатого нагружения в интервале до 98 Н.

Экспериментально установлено, что в условиях тяжело нагруженного контакта, к которым относится реверсивное трение, покрытия меди, показали низкую интенсивность изнашивания, соизмеримую с её показателями при трении в режиме избирательного переноса, когда потери на износ предельно малы [16]. Следовательно, покрытие меди, нанесённое как при низкой так и при высокой температуре потока воздуха, обладает высокой работоспособностью при испытаниях в условиях граничного трения: интенсивность изнашивания I_h (покрытия) $\approx (1,1 \dots 1,5) \cdot 10^{-10}$ и I_h (контртела) $\approx (0,3 \dots 0,4) \cdot 10^{-11}$ при смазке маслом И-20А; I_h (покрытия) $\approx (2 \dots 5) \cdot 10^{-10}$ и I_h (контртела) $\approx 0,2 \cdot 10^{-11}$ при трении в среде в Литол-24 [11]. Основываясь на данных по суммарному износу меди, отмечается, что при испытаниях пары в среде масла И-20А покрытие, нанесенное при 450 °С, обладает более высокой износостойкостью; при трении в среде Литол-24, содержащей поверхностно-активные вещества, более эффективно сопротивляется износу покрытие, нанесенное при 270 °С.

При низком уровне разрушения поверхности образцов пары трения медное покрытие – сталь проявляется характерная особенность изменения величины износа в зависимости от внешней нагрузки, функциональная зависимость интенсивности изнашивания от давления на контакте имеет скачкообразный характер на всем пути трения. Частота и амплитуда скачков интенсивности износа зависит от

природы смазочной среды: в среде, содержащей поверхностно-активные составляющие эффект скачков более выражен. Он связан с явлением фрикционного массопереноса меди на поверхность стали и защиты сопряженной поверхности от разрушения.

К основным критериям оценки триботехнических характеристик (интенсивность изнашивания – критерий износостойкости и коэффициент трения – критерий механических потерь) относится также критерий предельно допустимого давления P_d (критерий несущей способности сопряжения), при котором испытываемые пары работают устойчиво, т.е. с наименьшими интенсивностями изнашивания обеих деталей для данного сочетания конструктивных и смазочных материалов [13]. Зависимости $I_h = f(P)$ для обоих материалов пары трения позволяют определять диапазон работоспособности сопряжения в целом.

На трибометре для исследования реверсивных пар трения скольжения МТ-8 оценивали несущую способность пары трения сталь ШХ15 – сталь 40Х с покрытием (Cu + Zn + Al₂O₃), напыленным при температуре 450 °С (рис. 6).

Видно, что на всем пути трения при всех внешних нагрузках имеет место прямой и обратный фрикционный массоперенос материала покрытия. Износ сопряженного образца (контртела стали ШХ15) при всех нагрузках не наблюдается, поверхность трения полностью защищена покрытием от разрушения.

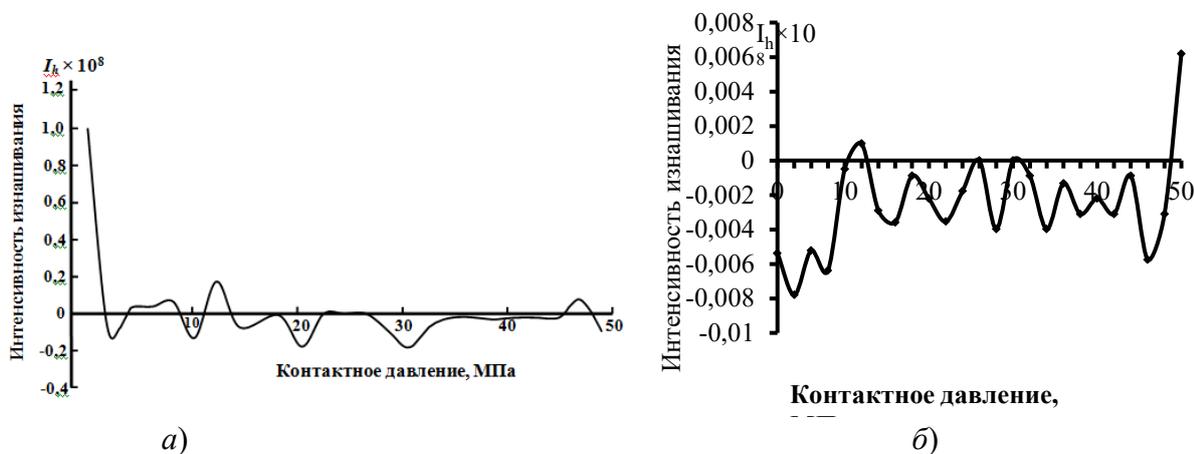


Рис. 6. Зависимость интенсивности изнашивания от контактного давления: а – износ покрытия Cu-Zn-Al₂O₃ на стали 40Х; б – износ контртела ШХ15 (б)

Fig. 6. Dependence of wear intensity on contact pressure: а – wear of the Cu-Zn-Al₂O₃ coating on steel 40X; б – wear of the counterbody BGA15 (b)

Следовательно, на основе результатов длительных испытаний в условиях тяжело-нагруженного контакта можно сделать вывод, что пара трения сталь – сталь с покрытием на основе меди, полученным газодинамическим методом, в результате фрикционного массопереноса в зоне контакта обладает высокой работоспособностью при давлении более 50 МПа.

Таким образом, триботехнические испытания при разных внешних условиях: отсутствии и наличии смазочной среды разной природы, разных схемах испытаний, разных внешних нагрузках и скоростях взаимного перемещений контактирующих тел показали высокую работоспособность нагруженных сопряжений, в состав которых входит покрытие, полученное методом холодного газодинамического напыления. При испытании пар трения наблюдается характерное явление – фрикционный массоперенос, составляющий основу защиты контактирующих поверхностей от разрушения в широком диапазоне контактных давлений.

Обсуждение результатов

Массоперенос материала с одной поверхности на другую является универсальным эффектом, являясь одним из важных составляющих, которые влияют на уровень поверхностного разрушения, несущую способность контакта и ресурс узла трения в целом. На основе результатов экспериментальных исследований в [17] описаны представления о наиболее распространенных механизмах фрикционного массопереноса. Наибольший эффект повышения износостойкости материала наблюдается при фрикционном массопереносе в условиях избирательного переноса [18]. Суть механизма состоит в формировании в зоне контакта слоя меди в результате физико-химических факторов при трении в поверхностно-активной смазочной среде и его последовательного переноса на сопряженную поверхность и обратно. Этот процесс имеет циклический характер, вызванный перераспределением дислокационной структуры и легирующих элементов, в результате чего пара трения переходит в режим практической безызносности. Важная роль в эффекте массопереноса при реализации явления избирательного переноса отводится твердым частицам, присутствующим в зоне контакта

(абразиву зернистостью ~ 3 мкм), влияющим не только на формирование фактической площади контакта, но и на деформационные процессы в поверхностных слоях, формирующих комплекс их трибологических свойств [19].

Фрикционный массоперенос металла является характерным эффектом при трении подшипниковых сплавов, в составе которых содержится мягкая структурная фаза, например, включения свинца или олова [20]. Вследствие резких различий характеристик механических свойств металлических фаз подшипникового сплава в процессе силового контактного взаимодействия на его поверхность выдавливается более мягкая из них. При достижении определенной толщины пленки переноса процесс контактного взаимодействия переходит в установившийся режим трения, характеризующийся взаимным переносом мягкой пленки на контртело и обратно. Практика показывает, что такая структура обеспечивает высокую работоспособность, например, алюминиевого антифрикционного сплава в результате отсутствия разрушения при заедании как при сухом, так и при граничном трении [21].

Покрытия $(\text{Cu} + \text{Al}_2\text{O}_3)$, $(\text{Zn} + \text{Al}_2\text{O}_3)$, $(\text{Cu} + \text{Zn} + \text{Al}_2\text{O}_3)$ имеют гетерофазную структуру, т.е. они относятся к композиционным материалам, которые состоят из двух или более фаз с существенно различающимися характеристиками механических свойств. В основе структуры содержатся твердые, прочные, износостойкие зерна (включения) корунда в значительно менее прочной, но более пластичной цементирующей матрице (меди, цинка или сплава на их основе). Высокая работоспособность при трении таких материалов связана с особенностями контактного взаимодействия стального контртела с составляющими гетерофазной структуры [8].

Допустим, что материал матрицы имеет предел текучести σ_1 , а частиц второй фазы – σ_2 , ($\sigma_2 \geq \sigma_1$), тогда характеристика трещиностойкости структурных составляющих будет находиться в обратном соотношении: $K_{1c1} > K_{1c2}$. В условиях трения по стали ШХ15 локальные напряжения в зоне контакта структурных составляющих покрытия с выступами шероховатости контртела не превышают величины σ_d . Следовательно, частицы твердой фазы не деформируются, но нагрузка от контртела,

передаваемая через них на матрицу, становится распределенной по площади контактного взаимодействия. Поэтому напряжения в матрице $\sigma_m < \sigma_l$, но $\sigma_1 > \sigma_m$. Таким образом, за счет перераспределения напряжений между структурными составляющими в зоне деформации реализуются оптимальные условия их работы. При ступенчатом повышении нагрузки в узле трения возможна релаксация напряжений в зоне контакта за счет пластической деформации матрицы, что может увеличивать ресурс работоспособности. В условиях, когда имеет место хрупкое разрушение частиц корунда, то оно распространяется на весь размер включения, а трещина остановится на межфазной границе с матрицей, не приводя к локальным разрушениям.

Приведенная схема механизма реализации процессов при контактном взаимодействии, создающих высокую работоспособность медных газодинамических покрытий, указывает на перспективность направления дальнейшего совершенствования структуры покрытий, основанном на разработке соотношений количества структурных составляющих и характеристик их механических свойств.

Как отмечалась выше, характерной особенностью трения гетерофазного медного покрытия, полученного методом газодинамического напыления, по стали является фрикционный массоперенос, который приводит к реализации режима практической безызносности. Основываясь на особенностях механического взаимодействия составляющих контакта покрытия и стали, можно предположить следующий механизм фрикционного массопереноса при трении такой пары. На начальном этапе трения в контакт вступают две псевдоповерхности. Одну из них составляют частицы корунда, выступающие над поверхностью покрытия, а вторую – вершины профиля микронеровностей, имеющие характеристики R_a , R_z и R_l . При нагружении пары и смещении поверхностей относительно друг друга частицы корунда врезаются в вершины микронеровностей контртела на глубину выступающих частиц корунда, что значительно меньше параметров микрогеометрии стали, улучшая таким образом качество поверхности. Остальная часть вершин микронеровностей, не подвергшихся механическому воздействию частиц корунда,

как инструмент врезается в поверхность покрытия и срезает слой металла, который остаётся на поверхности контртела, увеличивая его массу. В этих условиях в результате съёма металла покрытия повышается размер выступающей над поверхностью части включений корунда и уширением их основания.

При увеличении пути трения и ступенчатом повышении внешнего давления наиболее выступающие частицы корунда оказывают существенное влияние на формирование профиля поверхности контртела, что может сопровождаться обратным переносом на покрытие не только ранее «захваченных» микрообъёмов меди, но и стальных фрагментов микронеровностей контртела, тем самым изменяя массу образца с покрытием. В результате сформировавшийся микрорельеф контртела механически воздействует на покрытие и переносит его значительную массу, что способствует формированию тонкой плёнки металла, прочно закреплённой в углублениях микрорельефа поверхности контртела. Эти процессы циклически повторяются при увеличении пути трения. Следует отметить, что при механическом воздействии частиц корунда энергия поверхности контртела будет увеличиваться, что способствует созданию более прочных связей материала покрытия с поверхностью контртела, защищающих его от разрушения.

Особенности реализации фрикционного массопереноса при трении определяются размером и характером распределения частиц твердой фазы в матрице, характеристиками механических свойств составляющих фаз материала покрытия, условиями контактного взаимодействия. Поэтому универсальное явление фрикционного массопереноса является многофакторным.

Выводы

1. Показано, что механизм формирования структуры и трибологических свойств газодинамических покрытий состава $(Cu + Al_2O_3)$, $(Zn + Al_2O_3)$, $(Cu + Zn + Al_2O_3)$ соответствует закономерностям формирования комплекса свойств гетерофазной структуры, представляющей собой композиционные материалы, состоящие из двух или более фаз с существенно различающимися характеристиками

механических свойств. В основе структуры содержатся твердые, прочные, износостойкие зерна (включения) корунда в значительно менее прочной, но более пластичной цементирующей матрице (меди, цинка или сплава на их основе).

2. Результаты лабораторных триботехнических испытаний газодинамических покрытий на основе меди в паре со сталью при сухом трении, в условиях фреттинга и при граничной смазке показали высокую износостойкость материалов покрытий, соизмеримую с ее показателями, когда реализуется режим практической безызносности (явление избирательного переноса при трении). Установлено, что при трении таких пар в разных условиях испытаний наблюдается характерная закономерность, повышение работоспособности сопряжения связано с явлением фрикционного массопереноса в зоне контакта.

3. С позиций соотношения характеристик механических свойств структурных составляющих материала покрытия и условий их роли при формировании фактической площади контакта в условиях скользящей пары трения описаны представления о механизме формирования пленок фрикционного массопереноса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Конструкционные материалы.** Справочник. Под общей редакцией Б.Н. Арзамасова. М.: Машиностроение, 1990. 688 с.
2. **Елагина О.Ю.** Методы создания износостойких покрытий. М.: НЕДРА, 2010. 570 с.
3. **Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С.** Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.
4. **Архипов В.Е., Куксенова Л.И., Пугачев М.С., Козлов Д.А., Москвитин Г.В.** Влияние модифицированных медью поверхностных слоев на работоспособность пар трения скольжения сталь – сталь // Трение и износ, 2023. Т. 44. № 4. С. 322–334.
5. **Алхимов А.П., Клинков С.В., Косарев В.Ф., Фомин В.М.** Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика. М.: ФизМатЛит, 2010. 536 с.
6. **Архипов В.Е., Лондарский А.Ф., Москвитин Г.В., Пугачев М.С.** Газодинамическое напыление: структура и свойства покрытий. М.: КРА-САНД, 2017. 240 с.
7. **Архипов В.Е., Дубравина А.А., Куксенова Л.И., Лондарский А.Ф., Москвитин Г.В., Пугачев М.С.** Структура и свойства покрытий, нанесенных газодинамическим напылением // Упрочняющие технологии и покрытия. 2015. № 4. С.18–24.

8. **Тушинский Л.И., Потеряев Ю.П.** Проблемы материаловедения в трибологии. Новосибирск: НЭТИ, 1991. 64 с.

9. **Крагельский И.В.** Трение и износ. М.: Машиностроение, 1968. 480 с.

10. **Комбалов В.С.** Влияние шероховатости твердых тел на трение и износ. М.: Наука, 1974. 108 с.

11. **Куксенова Л.И., Архипов В.Е., Пугачев М.С., Козлов Д.А.** Структурно-фазовые превращения, массоперенос и триботехнические характеристики газодинамических медно-цинковых покрытий при трении скольжения // Научные технологии в машиностроении. 2025. № 2. С. 11–22.

12. **Ефремов, Б. Н. Латуни.** От фазового строения к структуре и свойствам. М: ИНФРА-М, 2020. 314 с.

13. **Куксенова Л.И., Герасимов С.А., Лаптева В.Г.** Износостойкость конструкционных материалов. М.: Изд-во МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2011. 273 с.

14. **Архипов В.Е., Лондарский А.Ф., Матвиенко Ю.Г., Москвитин Г.В., Пугачев М.С., Широкова Н.В.** Модификация поверхностей деталей нефтегазового оборудования газодинамическим напылением // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2018. Т. 8. № 2. С. 172–179.

15. **Сачек Б.Я., Мезрин А.М., Архипов В.Е., Лондарский А.Ф.** Модифицирование поверхностей трибосопряжений напылением металлических покрытий как средство повышения их фреттингостойкости // Трение и износ. 2018. Т. 39. № 4. С. 376–381.

16. **Kuksenova L.I. and Savenko V.I.** System-Structural Analysis of Tribological Behavior of Antifriction Materials in Friction Pairs Operating in Surfactants// Journal of Friction and Wear, 2024, Vol. 45, No. 5, pp. 294–307.

17. **Погосян А.К., Оганесян К.В.** Явление фрикционного переноса: основные закономерности и методы исследования. // Трение и износ. 1986. Т. 7. № 6. С. 998–1008.

18. **Kuksenova L.I., Savenko V.I.** Physicochemical Tribomechanics of Antifriction Materials Operating in Heavy-Loaded Friction Pairs in Active Lubricating Media // Friction and Wear. 2023. V. 44. № 6. P. 333–345.

19. **Бортник Г.И., Ханин Д.Е., Кострома В.В.** Исследование влияния величины зерна абразива на изнашивание металлов при трении в режиме избирательного переноса // Труды Всесоюзной научно-технической конференции «Электрохимические процессы при трении и использование их для борьбы с износом». Одесса: КМБ ВСНТО, 1973. С. 134–136.

20. **Буше Н.А., Алексеев Н.М., Трушин В.В., Маркова Т.Ф.** Механические процессы формирования вторичных структур подшипниковых сплавов // Трение и износ. 1981. Т. 11. № 2. С. 212–220.

21. **Буше Н.А., Маркова Т.Ф., Берент В.Я.** Оценка характеристик схватывания алюминиевых антифрикционных сплавов // Трение и износ. 1990. № 2. С. 253–258.

REFERENCES

1. Construction materials. Guide. Under the general editorship of B.N. Arzamasov. Moscow: Mashinostroenie, 1990. 688 p.

2. Elagina O.Y. Methods of wear-resistant coatings development. Moscow: NEDRA. 2010. 570 p.
3. Kragelsky I.V., Dobychin M.N., Kombalov V.S. Fundamentals of calculations for friction and wear. Moscow: Mashinostroenie. 1977. 526 p.
4. Arkhipov V.E., Kuksenova L.I., Pugachev M.S., Kozlov D.A., Moskvitin G.V. Influence of surface layers modified with copper on the performance of steel–steel sliding friction couples // Friction and wear, 2023. vol. 44. no. 4. pp. 322–334.
5. Alkhimov A.P., Klinkov S.V., Kosarev V.F., Fomin V.M. Cold gas dynamic spraying. Theory and practice. Moscow: FizMatLit. 2010. 536 p.
6. Arkhipov V.E., Londarsky A.F., Moskvitin G.V., Pugachev M.S. Gas dynamic spraying: structure and properties of coatings. Moscow: KRASAND. 2017. 240 p.
7. Arkhipov V.E., Dubravina A.A., Kuksenova L.I., Londarsky A.F., Moskvitin G.V., Pugachev M.S. Structure and properties of the coatings obtained by gas-dynamic spraying// Hardening technologies and coatings. 2015. no. 4. pp.18–24.
8. Tushinsky L.I., Poteriaev Yu.P. Problems of materials science in tribology. Novosibirsk: NETI Publ., 1991. p. 64
9. Kragelsky I.V. Friction and wear. Moscow: Mashinostroenie. 1968. 480 p.
10. Kombalov V.S. The influence of the roughness of solids on friction and wear. Moscow: Nauka. 1974. 108 p.
11. Kuksenova L.I., Arkhipov V.E., Pugachev M.S., Kozlov D.A. Structural and phase transformations, mass transfer, and tribotechnical characteristics of gas-dynamic copper-zinc coatings under sliding friction // Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2025. no. 2. pp. 11–22.
12. Yefremov, B. N. Brasses. From phase structure to structure and properties. Moscow: INFRA-M. 2020. 314 p.
13. Kuksenova L.I., Gerasimov S.A., Lapteva V.G. Wear resistance of structural materials. Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University. 2011. 273 p.
14. Arkhipov V.E., Londarsky A.F., Matvienko Yu.G., Moskvitin G.V., Pugachev M.S., Shirokova N.V. Modification of surface oil and gas equipment parts by gas-dynamic spraying // Science and technology of pipeline transportation of oil and petroleum products. 2018. vol. 8. no. 2. pp. 172–179.
15. Sachek B.Ya., Mezrin A.M., Arkhipov V.E., Londarsky A.F. Modification of the tribocouplings by spraying metal coatings to improve their fretting resistance. // Friction and wear. 2018. vol. 39. no. 4. pp. 376–381.
16. Kuksenova L.I. and Savenko V.I. System-Structural Analysis of Tribological Behavior of Antifriction Materials in Friction Pairs Operating in Surfactants// Journal of Friction and Wear. 2024. Vol. 45. No. 5. pp. 294–307.
17. Pogosyan A.K., Oganesyanyan K.V. The phenomenon of frictional transfer: basic patterns and research methods. // Friction and wear. 1986. vol. 7. no. 6. pp. 998–1008.
18. Kuksenova L.I., Savenko V.I. Physicochemical Tribomechanics of Antifriction Materials Operating in Heavy-Loaded Friction Pairs in Active Lubricating Media // Friction and Wear. 2023. V. 44. № 6. P. 333–345.
19. Bortnik G.I., Khanin D.E., Kostroma V.V. Investigation of the effect of abrasive grain size on metal wear during friction in the selective transfer mode // Proceedings of the All-Union Scientific and Technical Conference «Electrochemical processes in friction and their use to combat wear». Odessa: KMB VSNTO. 1973. pp. 134–136.
20. Boucher N.A., Alekseev N.M., Trushin V.V., Markova T.F. Mechanical processes of secondary structures formation for bearing alloys // Friction and wear. 1981. vol. 11. no. 2. pp. 212–220.
21. Boucher N.A., Markova T.F., Berent V.Ya. Evaluation of the setting characteristics of aluminum antifriction alloys // Friction and wear. 1990. no. 2. pp. 253–258.

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 23.05.2025; одобрена после рецензирования 17.06.2025; принята к публикации 21.06.2025.

The article was submitted 23.05.2025; approved after reviewing 17.06.2025; assepted for publication 21.06.2025.