



ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕРВИС МАШИН

MACHINERY TECHNICAL SERVICE

Том 62 № 1 2024

Vol. 62 N 1 2024

Научно-практический журнал «Технический сервис машин» является правопреемником издания «Труды ГОСНИТИ», основанного в 1963 году. Учредитель и издатель – Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ).

Scientific-practical journal «Machinery technical service» was founded in 1963. The founder and publisher is the Federal State Budgetary Scientific Institution «Federal Scientific Agroengineering Center VIM» (FSBSI FSAC VIM).

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) свидетельство о регистрации ПИ №ФС77-72932 от 25.05.2018 г.

Proceedings are registered with the Federal Service for Supervision in the Area of Communications of Information Technologies and Mass Communications (Roskomnadzor) ПИ №ФС77-72932 от 25.05.2018.

Адрес издателя, редакции и типографии:
109428, Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5, стр. 1.

Actual address of the publisher, editorial office and printing house:
109428, Moscow, 1 st Institutsky pass., 5. bld. 1.

Тел. 8 (495) 371-21-44; 8 (499) 174-88-11; e-mail: tsmvim@mail.ru; valpal-1938@mail.ru

Phone: 8 (495) 371-21-44; 8 (499) 174-88-11; e-mail: tsmvim@mail.ru; valpal-1938@mail.ru

Свидетельство о регистрации: ПИ №ФС77-72932 от 25.05.2018 года

Certificate of registration:
ПИ №ФС77-72932 from 25.05.2018.

Выходит 4 раза в год (Свободная цена).

It turns out 4 times a year (Free price).

Дата выхода в свет 22.12.2023 г.,

The format is 60x84 / 8. Circulation 100 copies.

Формат 60 x 84/8. Объем 16,5 п.л.,

Тираж 100 экз., заказ 959.

Отпечатано в типографии ФГБНУ ФНАЦ ВИМ

Printed in the printing house of the FSBSI FSAC VIM

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗНОШЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ
ГАЗОДИНАМИЧЕСКИМ НАПЫЛЕНИЕМ МЕДНО-ЦИНКОВЫХ ПОКРЫТИЙ**

*Владимир Евгеньевич Архипов, кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник, e-mail: vearkhipov@mail.ru;
Геннадий Викторович Москвитин, доктор технических наук, профессор;
Максим Сергеевич Пугачев, научный сотрудник*

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук,
Москва, Российская Федерация*

Реферат. Предварительные исследования медных и медно-цинковых покрытий, полученных газодинамическим напылением, показали высокие механические и трибологические свойства формируемых функциональных поверхностей. Влияние режимов напыления и последующей термической обработки на медно-цинковые газодинамические покрытия мало изучено. (Цель исследования) Исследовать влияние технологических режимов напыления, а также последующей термической обработки покрытия на его фазовый состав, структуру и свойства. (Материалы и методы) Наносили покрытие с помощью газодинамической установки фирмы «Димет» с различным перекрытием напыляемых слоев и последующей термической обработкой полученного покрытия при разных температурах и времени выдержки. Структуру покрытия исследовали на рентгеновском дифрактометре и спектрометре. Определяли когезионные свойства на разрывной испытательной машине методом «кольцевого отрыва», трибологические – на стенде МТ-8 при возвратно-поступательном скольжении плоских сопрягаемых тел. (Результаты и обсуждение) Определили, что по химическому и фазовому составу медно-цинковое покрытие, нанесенное при смещении сопла на два миллиметра и температуре потока воздуха 450 градусов Цельсия, после термической обработки в диапазоне температур 420-430 градусов Цельсия и времени выдержки 180 минут соответствует двухфазной латуни типа Л65. Исследование параметров решетки меди показывает, что уже после выдержки в печи в течение 60 минут формируется двухфазная структура на основе твердых растворов цинка в меди с разным содержанием меди и твердого раствора электронного типа на базе CuZn. (Выводы) Трибологические испытания медно-цинкового покрытия в среде индустриального масла И-20А позволили выявить наличие взаимного массопереноса меди и цинка с покрытия на контртело и обратно, что сопровождается эффектом безызносности при нагрузке до 10 мегапаскалей. Когезионная прочность медно-цинкового покрытия зависит от времени термической обработки (фазового состава) и после 60 минут выдержки превышает исходные показатели (примерно 78 мегапаскалей) и достигает примерно 93 мегапаскалей.

Ключевые слова: газодинамическое напыление, медно-цинковое покрытие, фазовый состав, трение, интенсивность изнашивания, когезионная прочность, термическая обработка, микрорельеф.

Для цитирования: Архипов В.Е., Москвитин Г.В., Пугачев М.С. Восстановление изношенных поверхностей трения скольжения газодинамическим напылением медно-цинковых покрытий // Технический сервис машин. 2024. Т. 62. №1. С. 51-59. DOI: 10.22314/2618-8287-2024-62-1-51-59. EDN: DJJVTY.

Scientific article

**RESTORATION OF WORN SLIDING FRICTION SURFACES BY GAS-DYNAMIC SPRAYING
OF COPPER-ZINC COATINGS**

*Vladimir E. Arkhipov, Ph.D.(Eng.), leading researcher;
Gennadiy V. Moskvitin, Dr.Sc.(Eng.), professor;
Maksim S. Pugachev, researcher*

*Institute of Mechanical Engineering named after A.A. Blagonravova
of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

Abstract. Preliminary studies of copper and copper-zinc coatings obtained by gas-dynamic spraying have shown high mechanical and tribological properties of the formed functional surfaces. The influence of the modes of spraying and subsequent heat treatment on copper-zinc gas dynamic coatings has been little studied. (Research purpose) The research purpose is investigating the effect of technological modes of spraying, as well as subsequent heat treatment of the coating on its phase composition, structure and properties. (Materials and methods) The coating was applied using a Dimet gas dynamic installation with different overlap of the sprayed layers and subsequent heat treatment of the resulting coating at different temperatures and exposure times. The structure of the coating was studied using an X-ray diffractometer and a spectrometer. Cohesive properties were determined on a bursting testing machine by the "ring separation" method, tribological properties were determined on the MT-8 stand during reciprocating sliding of flat mating bodies. (Results and discussion) It was determined that the chemical and phase composition of the copper-zinc coating applied with a displacement of the nozzle by two millimeters and an air flow temperature of 450 degrees Celsius, after heat treatment in the temperature range of 420-430 degrees Celsius and a holding time of 180 minutes corresponds to two-phase brass type L65. The study of the parameters of the copper lattice shows that after exposure in the furnace for 60 minutes, a two-phase structure is formed based on solid solutions of zinc in copper with different copper content and an electronic-type solid solution based on CuZn. (Conclusions) Tribological tests of the copper-zinc coating in the I-20A industrial oil medium revealed the presence of mutual mass transfer of copper and zinc from the coating to the counterbody and vice versa, which is accompanied by a wear-free effect at a load of up to 10 megapascals. The cohesive strength of the copper-zinc coating depends on the time of heat treatment (phase composition) and after 60 minutes of exposure exceeds the initial values (approximately 78 megapascals) and reaches approximately 93 megapascals.

Keywords: Gas-dynamic spraying, copper-zinc coating, phase composition, friction, wear intensity, cohesive strength, heat treatment, microrelief.

For citation: Arkhipov V.E., Moskvitin G.V., Pugachev M.S. Restoration of worn sliding friction surfaces by gas-dynamic spraying of copper-zinc coatings. Machinery technical service. 2 024. Vol. 62. N1. 51-59 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2024-62-1-51-59. EDN: DJJVTY.

Газодинамическое напыление позволяет наносить на поверхность разнообразные функциональные покрытия толщиной до 1 мм и более без значительного нагрева подложки ($\leq 150^\circ\text{C}$), что обеспечивает сохранение механических свойств материала подложки и отсутствие деформации. Перед нанесением покрытия не всегда возникает необходимость проводить очистку поверхности от нестойких загрязнений, так как наносимая порошковая смесь содержит кроме частиц металлов (Cu, Zn, Al, Ni и т. д.) частицы оксида алюминия (корунд), которые активируют и очищают поверхность. Если поверхность нуждается в устранении стойких загрязнений, то в установке, например, модели «Димет-404» имеются два бункера, один из которых содержит корунд, а другой смесь порошков для напыления. Поэтому нанесение слоя металла на изношенную поверхность проводится на одной установке без изменения положения детали, поверхность которой локально или целиком очищается корундом (бункер №1), а затем за счет пере-

ключения на подачу наносимой смеси порошков (бункер №2) проводится нанесение покрытия. Адгезия наносимого покрытия к подложке зависит от механических свойств наносимого металла и предварительной подготовки поверхности и составляет, например, для меди ≈ 50 МПа при когезионной прочности до 100 МПа.

Нанесение покрытий разного функционального назначения делает метод холодного газодинамического напыления весьма перспективным для восстановления поверхностей деталей машин и агрегатов, износ которых, как правило, не превышает 1 мм и имеет локальный характер [1].

В передовых странах Америки, Европы и Азии применение ГДН затрагивает различные области аэрокосмической, энергетической, морской, химической и нефтегазовой промышленности [2].

Область рассматриваемых конкретных изделий достаточно широка и касается изготовления и ремонта подшипников и пластин скольжения, судовых винтов, лопаток морских турбин и рулей,

изделий в силовой электронике и радиаторах с контактными ребрами. Исследуется влияние технологических параметров напыления, состава порошковых смесей, последующей и предварительной термической обработки при восстановлении деталей, подвергнутых циклической кавитации и нагрузкам и электрохимической коррозии [3].

Значительное внимание уделяется улучшению структуры и адгезионных свойств покрытий, включая использование мультиармированных углеродными наноструктурами и керамическими микрочастицами порошковых смесей для восстановления изделий из алюминиевых сплавов [4].

При исследовании покрытий на основе смеси частиц меди, цинка и корунда, нанесенных с использованием температуры потока воздуха в диапазоне 270-450 °С было выявлено наличие диффузии меди в цинк с формированием покрытия на основе меди, цинка и твердых растворов электронного типа на базе $CuZn_3$ (ϵ -фазы) и Cu_5Zn_8 (ϵ -фазы), характерных для сплавов медь – цинк (латуней) [5].

Твердость основных фаз составляет: медь $\approx 106 HV$, цинк $\approx 49 HV$ и твердые растворы электронного типа на базе $CuZn_3$ и $Cu_5Zn_8 \approx 170 HV$ и так как процесс формирования фаз, присущих латуням, проходит локально на базе частиц цинка, то в результате медно-цинковое покрытие имеет градиентную по твердости и фазовому составу структуру, что может обеспечить ему хорошие триботехнические свойства. Однако покрытия, наносимые с использованием механической смеси частиц металлов и корунда, содержат оксид алюминия, массовая доля которого зависит от используемых металлов и режимов напыления и находится в диапазоне $\leq 1-5\%$, что может оказывать влияние на износ сопряженной поверхности и пары трения в целом.

Пара трения сталь ШХ15–сталь ШХ15 с покрытием медью, напыленным при 450 °С, испытывалась в условиях реверсивного трения скольжения при давлении до 10 МПа. Показано, что сопряжение обладает высокой работоспособностью, износ предельно мал: интенсивность изнашивания покрытия составляет $(1,1-1,5) \times 10^{-10}$ и контртела – $(0,3-0,4) \times 10^{-11}$ в среде минерального масла И-20А; в пластичном смазочном материале Литол-24 интенсивность изнашивания покрытия и контртела составляют $(2-5) \times 10^{-10}$ и $0,2 \times 10^{-11}$ соответственно [6].

Сравнительный анализ результатов показал, что износ пары трения покрытие меди – сталь ШХ15 сопоставим с износом стали ШХ15 после азотирования в тлеющем разряде.

Исследование микрорельефа поверхности па-

ры трения по параметрам R_a и R_z выявило улучшение качества поверхности контртела на 1 класс с 10 до 11 и одновременно повышение качества поверхности покрытия с 9 до 10 класса. Исследователи данный результат обуславливают чисто механическим воздействием покрытия меди с включениями корунда, размер частиц которых менее 1 мкм на сопряженную поверхность («мягкое» шлифование).

Однако значение параметра R_t на некоторых этапах пути трения возрастает с $1,486 \times 10^{-6}$ м до $2,440 \times 10^{-6}$ м, что может быть свидетельством появления отдельных рисок от воздействия твердых частиц малого размера, которые могут находиться как в покрытии, так и между сопряженными поверхностями. Сравнительные испытания покрытия меди и медно-цинкового покрытия в условиях сухого трения в паре с образцом из коррозионностойкой жаропрочной высоколегированной стали аустенитного класса ЭП302 при удельном давлении до 10 МПа и времени испытания в течение 6 ч показали, что при нормальной температуре интенсивность изнашивания медно-цинкового покрытия более чем в три раза меньше, чем покрытия меди. У контртела в паре с покрытием меди износ существенный, а в паре с медно-цинковым покрытием в пределах точности измерения износ контртела выявить не удалось. Исследователи этот результат связывают с наличием эффекта массопереноса меди и цинка. При увеличении температуры испытания до 250 °С интенсивность изнашивания покрытия меди $1,0 \times 10^{-8}$ в три раза ниже, чем интенсивность изнашивания медно-цинкового покрытия $3,0-3,2 \times 10^{-8}$. При этом интенсивность изнашивания образца – кольца в паре с покрытием меди ($< 0,38 \times 10^{-8}$) практически на порядок меньше, чем при работе образца в паре с медно-цинковым покрытием, где интенсивность изнашивания составила $1,2-3,7 \times 10^{-8}$.

Изменение трибологических свойств медно-цинкового покрытия при повышении температуры испытания до 250 °С (6 ч) связано с процессами диффузии (взаимодиффузии) в нанесенном слое металла и изменением структуры, фазового состава и свойств покрытия.

Предварительные результаты испытания покрытия меди и медно-цинкового покрытия показывают возможность использования технологии газодинамического напыления для восстановления изношенных поверхностей трения. Нужно иметь в виду, что в процессе взаимодействия сопряженных пар трения скольжения возникают кон-

тактные напряжения и микродеформации, которые сопровождаются диффузией (взаимодиффузией) компонентов, как, впрочем, и нагрев, что может приводить к изменению фазового состава и структуры покрытия в процессе работы. Поэтому возникает необходимость проведения исследований влияния этих факторов на структуру и свойства покрытия и трибологические свойства поверхности.

Цель исследования – исследовать влияние параметров напыления и последующей температуры и времени термической обработки на фазовый состав, структуру и свойства медно-цинкового покрытия.

Материалы и методы. Покрытие на подложку из стали 40X напыляли с использованием газодинамической установки «Димет-404» при скорости перемещения сменного сопла относительно поверхности образца 10 мм/с, расстоянии от среза сопла до поверхности 10 мм и температуре потока воздуха 450 °С. Для напыления применяли готовую смесь частиц металлов и химического соединения в состоянии поставки. Соотношение ингредиентов в смеси составляло, %: $Cu : Zn : Al_2O_3 = 35 : 35 : 30$ (марка С-01-11) [7].

Нанесение покрытия осуществляли в двух вариантах, а именно при смещении сопла на 3 мм, при котором перекрытие следующим слоем металла предыдущего составляет 64% ($K_{пер} \approx 64\%$ – вариант 1), и 2 мм ($K_{пер} 55\%$ – вариант 2) при двух проходах сопла над поверхностью образца (толщина слоя). Последующую термическую обработку проводили в печи по режимам: выдержка в интервале температур 410-420°С (вариант 1) и 420-430°С (вариант 2) в течение 3, 5, 10, 20, 40, 60, 180 мин.

Фазовый состав покрытий системы $Cu-Zn$ определяли на многофункциональном рентгеновском дифрактометре *Rigaku Ultima IV* в медном K_{α} -излучении при параллельном пучке. Для формирования параллельного пучка использовали рентгеновскую оптику в виде многослойного параболического зеркала. Дифрактограммы снимали в симметричном режиме, диапазон сканирования $2\theta = 20 - 120^\circ$, шаг $0,05^\circ$, скорость детектора 3 град/мин.

Анализ дифрактограмм осуществляли на основе программного продукта *PDXL (Rigaku)* с использованием базы данных *PDF-2*. Количественный анализ проводили методом Ритвельда, реализованным в пакете программ *PDXL (Rigaku)*.

Рентгенофлуоресцентный анализ осуществляли на спектрометре *Rigaku Primus II* в вакууме с

применением в качестве источника рентгеновского излучения рентгеновской трубки с Rh -анодом; диапазон элементов – от Ca до U . Количественный анализ выполняли после записи и расшифровки экспериментальных спектров от исследуемых образцов с помощью специального программного обеспечения фирмы *Rigaku ZSX* методом фундаментальных параметров *SQX* (без эталонных образцов).

Когезионную прочность медно-цинкового покрытия в исходном состоянии и после термической обработки исследовали методом «кольцевого отрыва». Для испытаний использовали универсальную сервогидравлическую испытательную машину фирмы *SHIMADZU*. Скорость перемещения активного захвата составляла 0,002 мм/с.

Когезионную прочность покрытия определяли как отношение предельной нагрузки, предшествующей разрушению покрытия, к площади нанесенного покрытия. Используя расчетные данные, строили зависимость величины когезионной прочности покрытия медь–цинк от времени термической обработки.

Триботехнические испытания пар сталь 40X с покрытием–сталь ШХ15 проводили на стенде МТ-8 при возвратно-поступательном скольжении плоских сопрягаемых тел. Выбор схемы трения обусловлен тем, что реверсивный вид движения пары трения относится к наиболее тяжелым и позволяет адекватно выявить преимущества или недостатки того или иного вида обработки конструкционных материалов. Величины интенсивности изнашивания I_h определяли по потере массы каждого из образцов пары, оценивали также суммарную интенсивность изнашивания покрытия I_{Σ} , отражающую его предельный износ и предельную работоспособность пары в целом.

Результаты и обсуждение. Рентгенофлуоресцентный анализ показал, что нанесенное покрытие состоит из 64,8% Cu и 35,0% Zn . В соответствии с диаграммой состояния $Cu-Zn$ такому содержанию компонентов соответствует область существования твердого раствора цинка в меди (α -фаза) и твердого раствора электронного типа на базе $CuZn$ (β' -фаза), т. е. двойной латуни Л65.

Перед оценкой и интерпретацией результатов рентгеноструктурного анализа следует отметить, что основными факторами, влияющими на диффузию (взаимодиффузию) и формирование фазового состава наносимого слоя металла во время операции напыления, является деформация твердыми частицами корунда частиц меди, а также

температура и время процесса, которые зависят от смещения сопла относительно ранее нанесенного слоя *Кнер* и количества проходов сопла над поверхностью (толщины покрытия) [8].

Результаты рентгеноструктурного фазового анализа медно-цинкового покрытия, нанесенного при смещении сопла на 3 мм с последующей термической обработкой при температуре 410-420 °С и при смещении сопла на 2 мм с последующей термической обработкой при температуре 420-430 °С представлены в таблице 1.

Фазы и химические соединения		Массовая доля химических соединений и фаз, % вариант 1/ вариант 2							
		Время выдержки, мин							
		0	3	5	10	20	40	60	180
<i>Cu</i>		58/33	48/44	40/43	28/33	28/31	22/25	22/18	3/-
α -тв. р-р		-	1/-	15/20	18/39	19/42	33/48	40/67	64/84
<i>CuZn</i> (β')		-	-	-/37	30/28	31/27	29/27	19/15	17/16
<i>Cu₅Zn₈</i> (γ)		-/49	44/56	45/-	24/-	22/-	16/-	19/-	16/-
<i>Zn</i>		23/18	7/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-
η -фаза		19/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-

У медно-цинкового покрытия, нанесенного с меньшим временем напыления (*Кнер* \approx 55%) диффузия меди в цинк позволяет сформироваться твердому раствору меди в цинке (η -фаза) с массовой долей 19% при наличии исходных компонентов меди и цинка с массовой долей 58 и 23% соответственно (табл. 1). У медно-цинкового покрытия, нанесенного с меньшим смещением сопла (2 мм) за счет более длительного процесса напыления, диффузия меди в цинк проходит более интенсивно, что позволяет сформироваться твердому раствору электронного типа на базе *Cu₅Zn₈* (γ -фаза), с массовой долей 49% при наличии чистой меди и цинка, массовая доля которых составляет 33 и 18% соответственно (табл. 1).

На основе результатов рентгеноспектрально-го и рентгеноструктурного анализа показано существенное влияние на процесс структурно-фазовых превращений деформации частиц меди, формирования значительного количества точечных и протяженных дефектов (вакансий и дислокаций) и также измельчения субструктуры (областей когерентного рассеяния), которые, как показывают теоретические основы процессов диффузии, способствуют кооперированному смещению атомов

и прохождению межграницной диффузии и диффузии по вакансионному механизму и модифицированию частиц цинка атомами меди с формированием фаз, присущих латуням.

Термическая обработка медно-цинкового покрытия (*Кнер* \approx 55%) при температуре ниже точки плавления цинка не позволяет за счет диффузии цинка в медь, даже при времени выдержки в течение 180 мин, получить фазовый состав, соответствующий двойным латуням, так как в них присутствует медь с массовой долей около 3%, что в сплавах меди с цинком (латунях) не должно наблюдаться.

В то же время у медно-цинкового покрытия, нанесенного с коэффициентом перекрытия 64%, термическая обработка при температуре выше точки плавления цинка (420-430 °С) и максимальном времени выдержки 180 мин сопровождается формированием структуры на основе двух фаз (α и β'), что соответствует двойным латуням. Поэтому можно однозначно сказать, что медно-цинковое покрытие, нанесенное при смещении сопла на два миллиметра при температуре потока воздуха 450 °С, после термической обработки при температуре в интервале 420-430 °С в течение 180 мин по химическому и фазовому составу соответствует двойной латуни Л65. Дополнительный анализ параметров решетки основных фаз медно-цинкового покрытия позволяет сделать некоторые уточнения по состоянию структуры (табл. 2).

Фазы		Период решетки, нм							
		Время выдержки, мин							
		0	3	5	10	20	40	60	180
Термическая обработка в диапазоне 410-420°С									
<i>Cu</i>		0,3615	0,3615	0,3614	0,3615	0,3615	0,3619	0,3622	0,3873
α -тв. р-р		-	0,3718	0,3679	0,3694	0,3696	0,3697	0,3697	0,3701
<i>CuZn</i> (β')		-	-	-	0,2950	0,2951	0,2952	0,2952	0,2952
<i>Cu₅Zn₈</i> (γ)		-	0,8887	0,8861	0,8860	0,8858	0,8850	0,8839	0,8880
Термическая обработка в диапазоне 420-430°С									
<i>Cu</i>		0,3615	0,3613	0,3613	0,3611	0,3622	0,3624	0,3633	-
α -тв. р-р		-	-	0,3695	0,3697	0,3699	0,3698	0,3687	0,3678
<i>CuZn</i> (β')		-	-	0,2951	0,2951	0,2950	0,2955	0,2951	0,2983

Как видно из представленных результатов, после термической обработки покрытия в течение

180 мин при температуре 410-420 °С параметры решетки меди значительно отличаются от исходных, что можно считать как наличие еще одного твердого раствора цинка в меди. В таком случае это покрытие также следует отнести к латуням, только с учетом того, что это тройная латунь, у которой вместе с твердым раствор цинка в меди двух типов, то есть с разным содержанием меди и цинка присутствуют два твердых раствора электронного типа на базе $CuZn$ (β' -фаза) и Cu_5Zn_8 (γ -фаза) [9].

Таким же образом можно оценить состояние структуры медно-цинкового покрытия после термической обработки при температуре 420-430 °С. Как видно из представленных результатов, после термической обработки покрытия в течение 60 мин период решетки меди составляет 0,3633 нм и, если оценивать зависимость параметра решетки от содержания меди, то данный твердый раствор цинка в меди содержит ≈ 90 ат% меди. В литературе сплав с содержанием меди порядка 90 ат% носит название томпак – красная латунь, и в таком случае медно-цинковое покрытие после термической обработки в течение 60 мин следует также считать латунией с присутствием двух типов твердого раствора.

Когезионная прочность металла покрытия в исходном состоянии имеет величину 78 МПа, что несколько ниже, чем когезия покрытия меди (88 МПа) и цинка (95 МПа), нанесенного при аналогичной температуре напыления. Термическая обработка в течение 5 мин снижает когезию покрытия достаточно существенно до $\approx 64,6$ МПа, что может быть связано с формированием β' -фазы, увеличение содержания которой значительно снижает прочность и пластичность латуней [10].

При увеличении времени термической обработки до 10 мин когезионная прочность металла покрытия повышается до $\approx 75,4$ МПа и достигает практически исходной, что обусловлено увеличением массовой доли твердого раствора цинка в меди (α -фазы) с 20 до 39% и уменьшением содержания твердого раствора электронного типа на базе $CuZn$ (β' -фазы) с 37 до 28%. Дальнейшее повышение времени выдержки в печи до 20 мин сопровождается максимальным снижением когезии до уровня $\approx 42,6$ МПа.

Увеличение времени термической обработки до 60 мин и более сопровождается повышением когезионной прочности медно-цинкового покрытия до величины более 90 МПа, что безусловно связано с увеличением массовой доли твердого раствора цинка в меди и снижением массовой доли хрупкой β' -фазы (рис. 1).

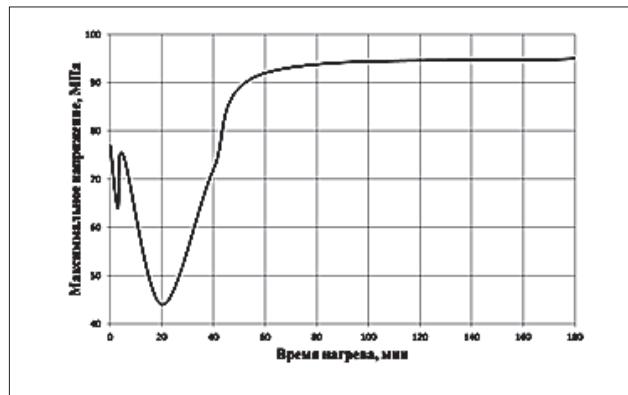


Рис. 1. Зависимость когезионной прочности покрытий на основе смеси частиц меди и цинка от времени термической обработки при температуре 420-430 °С

Fig. 1. Cohesive strength of coatings based on a mixture of copper and zinc particles on the time of heat treatment at a temperature of 420-430 °С

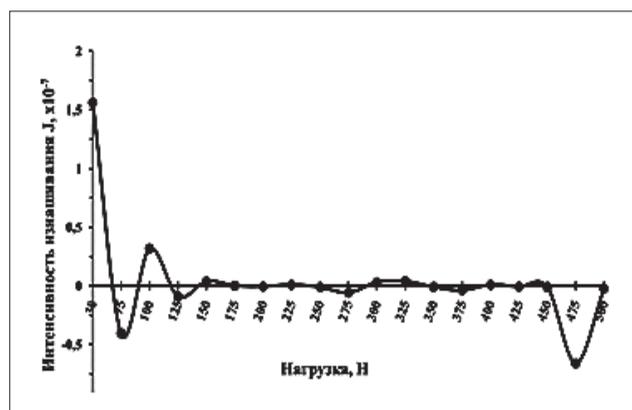
Исходя из полученных результатов металлофизических исследований и испытаний на когезионную прочность металла покрытия представляет интерес оценка трибологических свойств медно-цинковых покрытий в исходном состоянии, а также после термической обработки в течение 10, 60 и более минут. После термической обработки формируется градиентная по твердости структура (100-120 и 300-320 МПа), когезионная прочность не отличается от исходной, а при термической обработке в течение 60 мин и выше имеет более высокое значение. Поэтому для исследования трибологических свойств пары было выбрано медно-цинковое покрытие в исходном состоянии и после термической обработки в течение 10 мин.

Экспериментальные данные величины износа стали 40Х с медно-цинковым покрытием и контртела из стали ШХ15 в процессе испытаний пары трения в неактивном жидком смазочном материале (индустриальное масло) при ступенчатом повышении внешнего давления привели на рисунке 2 [11].

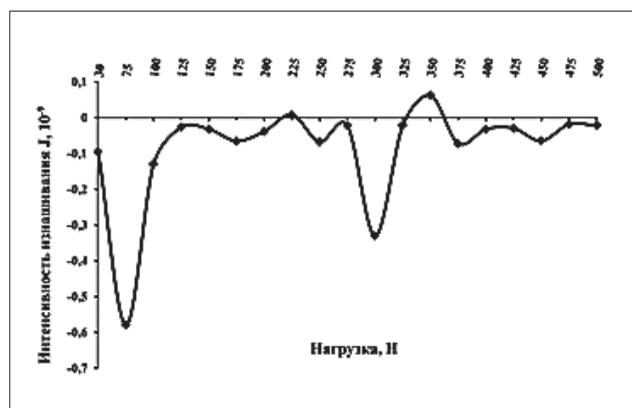
Видно, что после небольшого пути трения при минимальной нагрузке наблюдается резкое уменьшение интенсивности изнашивания покрытия с $1,0 \times 10^{-7}$ до нулевой отметки, а дальнейшее увеличение давления сопровождается частичным переносом медно-цинкового покрытия на сопряженное контртело. Этот процесс на основном образце (сталь 40Х) имеет выраженный волнообразный характер, его особенность состоит во взаимном переносе материала покрытия на контртело и наоборот. При повышенном давлении износ образца с покрытием практически приближается к нулю, а некоторое изменение на отдельных участках пу-

ти трения сопровождается частичным переносом покрытия на контртело.

Приведенные зависимости уровня поверхностного разрушения сопряжения от давления при трении дают основания полагать, что в основе механизма контактного взаимодействия стали с покрытием $Cu-Zn-Al_2O_3$ со сталью ШХ15 лежит процесс массопереноса в зоне поверхностной пластической деформации, который минимизирует уровень поверхностного разрушения. Следует заметить, что износ сопряженного образца (контртела) при всех нагрузках не происходит: поверхность трения полностью защищена покрытием типа «латуни», сформировавшимся в результате массопереноса в зоне контакта и намазывания медного сплава на него.



a



b

Рис. 2. Зависимость интенсивности изнашивания от нагрузки на образец: а – сталь 40X с покрытием типа «Латунь», нанесенным при температуре 450 °C; б – контртело сталь ШХ15
Fig. 1. Dependence of wear rate on the load on the sample: а – 40X steel with a "Brass" coating applied at a temperature of 450 °C; б – counterbody steel ШХ15

Термическая обработка покрытия, изменяющая его структурно-фазовое состояние, усиливает нестабильность трения на начальных этапах испытаний, но в процессе повышения нагрузки уве-

личивается толщина сформированного покрытия на контробразце, предотвращая его разрушение.

При трении не происходит изменения класса чистоты обработки контртела; несколько снижаются микрогеометрические характеристики покрытия в пределах исходного класса чистоты обработки (табл. 3).

Как отмечалось выше, триботехнические испы-

Материал покрытия	Характеристики микрогеометрии поверхности					
	Исходное состояние		Класс чистоты	После трения		Класс чистоты
	R_a	R_z		R_a	R_z	
Контртело–сталь ШХ15						
Исходное покрытие	0,527	3,555	8-9	0,386	2,314	9-8
Покрытие после ТО	0,435	2,975	8-9	0,680	1,645	8-9
Основной образец–сталь 40X с покрытием						
Исходное покрытие	0,285	1,955	9	0,566	4,412	8
Покрытие после ТО	0,276	1,668	9	0,276	2,081	9

тания проводили в условиях ступенчатого повышения внешней нагрузки в диапазоне 30-500 Н. При этом покрытие (как в исходном состоянии, так и после термической обработки) практически не изнашивается в установившемся режиме трения и, более того, значение критического давления ($P_{кр}$, при котором появляются следы задиров) для указанного нагрузочного режима не достигается. Следовательно, полученные экспериментальные результаты дают основание предполагать, что исследуемое покрытие $Cu-Zn$, полученное методом газодинамического напыления, обладает способностью выдерживать существенно более высокие внешние давления, т. е. обладает высокой несущей способностью в условиях реверсивного трения скольжения.

Исходя из рассмотренной структуры покрытия – наличия и размера частиц корунда, рельефа поверхности, а также градиентного фазового состава и твердости можно предложить следующий механизм безызносности. Медное или медно-цинковое покрытие с включениями частичек корунда можно представить в виде абразивного инструмента. Твердые частицы корунда, вступая в контакт с поверхностью контртела, активируют поверхность (повышают энергию) и создают рельеф (твердые выступы), которые своими микро-

неровностями захватывают, переносят и удерживают микрочастицы меди и цинка на поверхности трения. Поэтому на начальном этапе приработки наблюдается снижение массы образца с покрытием и увеличение массы контртела. Так как при испытании сопряженные поверхности находятся в относительном скольжении, то частицы корунда, находящиеся в покрытии, захватывают медь и цинк с поверхности контртела и переносят обратно на покрытие. В то же время микрорельеф контртела захватывает микрочастицы меди и цинка с поверхности покрытия, и этот процесс повторяется непрерывно, что, собственно, приводит к эффекту безызносности.

Выводы. Термическая обработка медно-цинкового покрытия, нанесенного газодинамическим напылением при температуре 450 °С и смещении сопла на 2 мм после термической обработки в печи при температуре 420-430 °С и времени выдержки 180 мин позволяет получить покрытие, которое по химическому и фазовому составу соответствует латуни марки Л65.

Термическая обработка медно-цинкового покрытия, нанесенного газодинамическим напылением при температуре 450 °С и смещении сопла на 2 мм после термической обработки в печи при температуре 420-430 °С и времени выдержки 60 мин позволяет получить покрытие типа двойных латуней, где присутствуют твердые растворы цинка в меди с разным содержанием меди.

Испытания сопряженной пары медно-цинковое покрытие–сталь 40Х в среде индустриального масла при нагрузке до 10 МПа показывают присутствие эффекта массопереноса, который сопровождается наличием безызносности пары трения.

Нахождение в механической смеси частиц металлов (меди, цинка), оксида алюминия (корунда) не оказывает влияния на качество поверхности нанесенного покрытия и контртела. Необходимо проводить дальнейшие исследования трибологических свойств медно-цинкового покрытия как в исходном состоянии, так и после термической обработки (покрытие латуни) для определения предельной нагрузки с целью оценки области применения технологии газодинамического напыления при восстановлении поверхностей трения скольжения.

Библиографический список

1. Лобачевский Я.П., Миронов Д.А., Миронова А.В. Основные направления повышения ресурса быстроизнашиваемых рабочих органов сельскохозяйственных машин // *Сельскохозяйственные машины и техноло-*

гии. 2023. Т. 17. №1. С. 41-50. DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-1-41-50.

2. Wu K., Sun W., Tan A. An investigation into microstructure, tribological and mechanical properties of cold sprayed Inconel 625 coatings. *Surface and Coatings Technology.* 2021. N424. 127660. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2021.127660.

3. Zongxiao Zhu, Tianzuo Shi, Jun Yang. Effect of WC-17Co content on microstructure, mechanical properties and tribological behavior of low-pressure cold sprayed tin bronze composite coating. *Surface and Coatings Technology.* 2023. N465. 129589. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129589>.

4. Pengyuan Diao, Fang Wang, Zexin Yu. Microstructure, mechanical properties, and cavitation erosion performances of cold sprayed CuZn35 coatings. *Surface and Coatings Technology.* 2022. N451(1). 129074. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.129074>.

5. Fu Jun Wei, Bang Yen Chou, Shu Yi Tsai. Thermomechanical properties of cold-sprayed copper coatings from differently fabricated powders. *Surface and Coatings Technology.* 2022. N434. 128.128. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128128>.

6. Winnicki M., Baszczuk A., Jasiorski M. Experimental study on aluminium bronze coatings fabricated by low pressure cold spraying and subsequent heat treatment. *Surface and Coatings Technology.* 2023. N456(1). 129260. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129260>.

7. Bruera A., Bolelli G., Lusvardi L. Adhesion of cold sprayed soft coatings: Effect of substrate roughness and hardness. *Surface and Coatings Technology.* 2023. N466. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129651>.

8. Xie X., Yin S., Raoelison R. Al matrix composites fabricated by solid-state cold spray deposition: A critical review. *J. Mater Sci Technol.* 2021. N86. 20-55. DOI: 10.1016/j.jmst.2021.01.026.

9. Архипов В.Е., Москвитин Г.В., Муравьева Т.И. и др. Особенности формирования медно-цинковых покрытий // *Упрочняющие технологии и покрытия.* 2023. №6. С. 270-276. DOI: 10.36652/1813-1336-2023-19-6-270-276.

10. Архипов В.Е., Куксенова Л.И., Пугачев М.С. и др. Влияние модифицированных медью поверхностных слоев на работоспособность пар трения скольжения сталь–сталь // *Трение и износ.* 2023. Т. 44. №4. С. 322-335. DOI: 10.32864/0202-4977-2023-44-4-322-334.

11. Куксенова Л.И., Козлов Д.А. Анализ зависимости триботехнических свойств медных сплавов от структурно-фазовых превращений в поверхностном слое // *Вестник научно-технического развития.* 2023. N2(169). С. 14-28. DOI: 10.18411/vntr2023-169-2.

References

1. Lobachevskiy Ya.P., Mironov D.A., Mironova A.V. *Increasing the operating lifetime of wearable working bodies of agricultural machines. Agricultural machines and technologies.* 2023. Vol. 17. N1. 41-50 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-1-41-50.
2. Wu K., Sun W., Tan A. *An investigation into microstructure, tribological and mechanical properties of cold sprayed Inconel 625 coatings.* *Surface and Coatings Technology.* 2021. N424. 127660. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2021.127660.
3. Zongxiao Zhu, Tianzuo Shi, Jun Yang. *Effect of WC-17Co content on microstructure, mechanical properties and tribological behavior of low-pressure cold sprayed tin bronze composite coating.* *Surface and Coatings Technology.* 2023. N465. 129589. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129589>.
4. Pengyuan Diao, Fang Wang, Zexin Yu. *Microstructure, mechanical properties, and cavitation erosion performances of cold sprayed CuZn35 coatings.* *Surface and Coatings Technology.* 2022. N451(1). 129074. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.129074>.
5. Fu Jun Wei, Bang Yen Chou, Shu Yi Tsai. *Thermomechanical properties of cold-sprayed copper coatings from differently fabricated powders.* *Surface and Coatings Technology.* 2022. N434. 128128. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128128>.
6. Winnicki M., Baszczuk A., Jasiorski M. *Experimental study on aluminium bronze coatings fabricated by low pressure cold spraying and subsequent heat treatment.* *Surface and Coatings Technology.* 2023. N456(1). 129260. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129260>.
7. Bruera A., Bolelli G., Lusvarghi L. *Adhesion of cold sprayed soft coatings: Effect of substrate roughness and hardness.* *Surface and Coatings Technology.* 2023. N466. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129651>.
8. Xie X., Yin S., Raelison R. *Al matrix composites fabricated by solid-state cold spray deposition: A critical review.* *J. Mater Sci Technol.* 2021. N86. 20-55. DOI: 10.1016/j.jmst.2021.01.026.
9. Arkhipov V.E., Moskvitin G.V., Muravyeva T.I., et al. *Features for formation of copper-zinc coatings. Strengthening technologies and coatings.* 2023. N6. 270-276 (In Russian). DOI: 10.32864/0202-4977-2023-44-4-322-334.
10. Arkhipov V.E., Kuksenova L.I., Pugachev M.S., et al. *The influence of copper-modified surface layers on the performance of steel-steel sliding friction pairs.* *Friction and wear.* 2023. Vol. 44. N4. 322-335 (In Russian). DOI: 10.32864/0202-4977-2023-44-4-322-334.
11. Kuksenova L.I., Kozlov D.A. *Analysis of the dependence of tribotechnical properties of copper alloys on structural and phase transformations in the surface layer.* *Bulletin of scientific and technical development.* 2023. N2(169). 14-28 (In Russian). DOI: 10.18411/vntr2023-169-2.

Заявленный вклад соавторов

Архипов В.Е. – подготовка текста, анализ литературных данных;
Москвитин Г.В. – научное руководство, анализ и доработка текста;
Пугачев М.С. – доработка, редактирование текста и литературных данных.
Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Contributions of the coauthors

Arkhipov V.E. – text preparation, analysis of literary data;
Moskvitin G.V. – scientific guidance, analysis and revision of the manuscript;
Pugachev M.S. – revision, editing of text and literary data.
All authors read and approved the final version of the manuscript.

Статья поступила в редакцию 21.12.2023

Статья принята к публикации 29.01.2024