

ENGINEER



international scientific journal

SPECIAL ISSUE

E-ISSN

3030-3893

ISSN

3060-5172



SLIB.UZ
Scientific library of Uzbekistan



A bridge between science and innovation



**TOSHKENT DAVLAT
TRANSPORT UNIVERSITETI**

Tashkent state
transport university



ENGINEER

A bridge between science and innovation

E-ISSN: 3030-3893

ISSN: 3060-5172

SPECIAL ISSUE

24-april, 2025



engineer.tstu.uz

**MUHAMMADAMIN KABULOVICH TOHIROVNING TAVALLUDINING
80 YILLIGIGA BAG'ISHLANGAN
“SAMARALI QURILISH MATERIALLARI, KONSTRUKSIYALARI VA
TEXNOLOGIYALARI”
MAVZUSIDAGI XALQARO ILMIY-AMALIY KONFERENSIYASI
ILMIY ISHLARI TO'PLAMI**

Toshkent davlat transport universiteti Rossiya Arxitektura va qurilish fanlari akademiyasining akademigi, O'zbekiston Respublikasida xizmat ko'rsatgan yoshlar murabbiysi, texnika fanlari doktori, professor **Muhammadamin Kabulovich Tohirovning tavalludining 80 yilligiga bag'ishlangan “Samarali qurilish materiallari, konstruksiyalari va texnologiyalari”** mavzusidagi xalqaro ilmiy-amaliy konferensiya ilmiy ishlari to'plami chop etildi.

Muhammadamin Kabulovich kompozitsion qurilish materiallarining polistrukturaviy nazariyasini rivojlantirishga ulkan hissa qo'shgan olimdir. 1995-yilda Muhammadamin Kabulovich Rossiya Arxitektura va qurilish fanlari akademiyasining (RAASN) xorijiy a'zosi etib saylangan, bu esa ularning qurilish materialshunosligi sohasiga qo'shgan ilmiy hissasining xalqaro miqyosdagi e'tirofi bo'ldi. Ular o'z ilmiy faoliyati davomida 6 ta monografiya, 200 dan ortiq ilmiy maqola va 25 ta ixtiroga mualliflik guvohnomasi yaratganlar.

Ushbu konferensiyaning asosiy maqsadi – qurilish materialshunosligi, bino va inshootlarni loyihalash hamda qurilish sohasidagi zamonaviy ilmiy tadqiqotlar natijalarini muhokama qilish, shuningdek, muhandislik ta'limini takomillashtirish yo'llarini aniqlashdir.

Konferensiyada O'zbekiston Respublikasi hamda xorijiy mamlakatlarning oliy o'quv yurtlari va ilmiy-tadqiqot institutlari olimlari, shuningdek, muhim ilmiy tadqiqot natijalariga ega bo'lgan ishlab chiqarish vakillari o'z ilmiy ishlari bilan ishtirok etdilar.

“Samarali qurilish materiallari, konstruksiyalari va texnologiyalari” mavzusidagi xalqaro ilmiy-amaliy konferensiyaning asosiy yo'nalishlari quyidagilardan iborat:

1. **Resurs va quvvatni tejaydigan qurilish materiallari va texnologiyalari** – zamonaviy ekologik va iqtisodiy talablarni qondirishga qaratilgan innovatsion yechimlar.
2. **Bino va inshootlarning qurilish konstruksiyalari, zamonaviy hisoblash va loyihalash usullari - muhandislik** va texnologik yechimlarni takomillashtirish yo'nalishlari.
3. **Arxitektura va shaharsozlik** – estetik va funksional jihatlarni uyg'unlashtirgan zamonaviy loyihalar yaratish.
4. **Zamonaviy muhandislik ta'limi tizimini takomillashtirish** – kelajak mutaxassislarini yuqori malakali darajada tayyorlash uchun ta'lim jarayonini modernizatsiya qilish.

Mazkur konferensiya ilmiy hamjamiyatning turli vakillarini bir joyga jamlab, qurilish materialshunosligi sohasidagi zamonaviy muammolar va istiqbollarni muhokama qilish uchun qulay platforma vazifasini bajardi.

Production of non-corrosive coatings based on copper and zinc by gas-dynamic method

G.V. Moskvitin¹, V.E. Arkhipov¹, M.S. Pugachev¹

¹Federal State Budgetary Institution of Science Blagonravov Institute of Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences (IMASH RAS), Moscow, Russia

Abstract: The paper examines copper and copper-zinc coatings (such as "brass") obtained by the method of "cold" gas-dynamic spraying. The X-ray diffraction phase analysis method revealed that zinc is the main element that "captures" corundum particles, but it cannot "retain" corundum particles under the influence of a conjugated surface, having separated from the coating surface, they have a significant effect on friction processes in the tribological pair. Two mechanisms are proposed that describe the effect on the nature of the change in the microgeometry of the surface of the counterbody and its wear. Tests of copper-zinc coating of brass type in the medium of industrial oil paired with steel ShKh15 showed low wear intensity up to the effect of non-wear without deterioration of the surface quality of the friction pair.

Keywords: copper coating; copper and zinc coating; brass; phase analysis, gas dynamic spraying; wear mechanisms

Получение безызносных покрытий на основе меди и цинка газодинамическим методом

Москвитин Г.В.¹, Архипов В.Е.¹, Пугачев М.С.¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН), Москва, Россия

Аннотация: В работе исследуются покрытия меди и меди - цинка (типа «латуни») полученные методом «холодного» газодинамического напыления. Методом рентгеноструктурного фазового анализа выявлено, что цинк является основным элементом, «захватывающим» частицы корунда, но он не может «удержать» частицы корунда под воздействием сопряжённой поверхности, отделившись от поверхности покрытия, они оказывают значительное влияние на процессы трения в трибологической паре. Предложены два механизма, описывающие влияние на характер изменения микрогеометрии поверхности контртела и его износ. Испытания медно-цинкового покрытия типа латуни в среде индустриального масла в паре со сталью ШХ15 показали низкую интенсивность изнашивания вплоть до эффекта безызносности без ухудшения качества поверхности пары трения.

Ключевые слова: покрытие меди; покрытие меди и цинка; латунь; фазовый анализ, газодинамическое напыление; механизмы изнашивания

1. Введение

Выбор материалов триботехнического назначения для тяжело нагруженных сопряжений определяется наличием комплекса определённых свойств, способных обеспечить работоспособность и долговечность изделия с учётом функциональных характеристик, особенно применительно к условиям эксплуатации. К таким характеристикам в первую очередь относится износостойкость и способность поверхностных эксплуатационных слоёв сопротивляться разрушению под воздействием нагрузок и агрессивных сред.

Для изготовления деталей пар трения скольжения используются разнообразные конструкционные материалы [1]. Для стальных тяжело нагруженных сопряжений эффективным средством повышения их несущей способности является создание модифицированных поверхностных слоёв. С этой целью применяются разнообразные методы, основанные на принципах химического, электрохимического и физического осаждения и формирования покрытий на

поверхности изделий [2]. В качестве материалов покрытий широкое распространение получили медные сплавы вследствие их способности создавать предпосылки для реализации положительного градиента механических свойств по толщине поверхностного эксплуатационного слоя и, следовательно, локализовать в нём физико-химические и деформационные процессы, ответственные за формирование частиц износа [3]. При этом в основе триботехнической эффективности медьсодержащих поверхностных слоёв является фрикционный массоперенос, который определяется их структурно-механическим состоянием.

Массоперенос материала с одной поверхности на другую является универсальным эффектом и имеет место практически при всех механизмах изнашивания, 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 [4] описаны представления о наиболее распространённых механизмах фрикционного массопереноса. Наибольший эффект повышения



износостойкости материала наблюдается при фрикционном массопереносе в условиях избирательного переноса [3]. 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.

В настоящее время для увеличения ресурса стальных пар трения получает применение метод «холодного» газодинамического напыления покрытия меди и медно-цинковых покрытий типа «латуни» [5,6]. Этот метод позволяет напылять функциональные покрытия на небольшие участки и значительные площади поверхности деталей в заводских и полевых условиях при минимальном разогреве подложки до 150°C. Метод реализуется путем введения в нагретый поток воздуха, механической смеси частиц металлов и химического соединения – твердого и хрупкого оксида алюминия (корунда), при соударении с которым и поверхностью металлы деформируются, уплотняются и за счёт этого повышается когезия нанесённого слоя металла и адгезия с подложкой. 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, что обусловлено наличием сжимающих напряжений разной величины [5]. Столь высокие значения позволяют рассчитывать на сопротивление разрушению нанесённого слоя металла под воздействием нормальных и касательных нагрузок.

Напыление покрытия с использованием механической смеси частиц меди, цинка и корунда сопровождается процессом модификации частиц цинка за счёт диффузии в них атомов меди с формированием структур, присущих латуням от твёрдого раствора цинка

в меди (α -фазы) до твёрдого раствора меди в цинке (η -фазы), что дало основание обозначить медно-цинковые покрытия, как покрытия типа «латуни» [6]. Наличие корунда в покрытиях, нанесённых методом «холодного» газодинамического напыления, как бы заранее предопределяет невозможность их использования для подшипников трения скольжения из-за износа сопряжённой поверхности – контртела или пары в целом. Однако, проведённые и проводимые испытания на трение в разных средах, показывают результаты, которые дают основание считать покрытия на основе меди и медно-цинковые покрытия типа «латуни» весьма перспективными для создания поверхностей трения скольжения (подшипников) как при изготовлении деталей и узлов, так и при их восстановлении.

Испытание покрытий меди, нанесённых при температуре 270°C и 450°C в сопряжении с контртелом из стали ШХ15, термически обработанной на 60-62 HRC в условиях смазки минеральным маслом И-20А и пластичном смазочном материале Литол-24, выявили низкую интенсивность изнашивания, соизмеримую с её показателями при трении в режиме избирательного переноса, когда потери на износ предельно малы [5]. Покрытие меди, нанесённое методом газодинамического напыления при использовании низкой и высокой температуры потока воздуха, обладает высокой работоспособностью при испытаниях в условиях трения и изнашивания: I_h (покрытия) $\approx (1,1-1,5) \times 10^{-10}$ и I_h (контртела) $\approx (0,3-0,4) \times 10^{-11}$ при смазке маслом И-20А и I_h (покрытия) $\approx (2-5) \times 10^{-10}$ и I_h (контртела) $\approx 0,2 \times 10^{-11}$ в Литол-24 [5]. Исследование микрогеометрии покрытия меди, нанесённого при температуре 450°C, и контртела по параметрам Ra и Rz показывает улучшение качества на 1 класс поверхностей трения для обеих сред испытания (табл.1), У покрытия, нанесённого при температуре 270°C только при испытании в масле И-20А не отмечено улучшения качества, что может быть обусловлено изменением свойств покрытия, например твёрдости [5].

Таблица 1

Результаты измерения микрогеометрии поверхности покрытия меди, нанесённого при 450С и контртела из стали ШХ15

Рабочая среда	Шероховатость, мкм					Класс чистоты, ∇
	До испытания		Класс чистоты, ∇	После испытания		
	R _a	R _z		R _a	R _z	
	Контртело из стали ШХ15					
Масло И-20А	0,135	0,785	10-11	0,057	0,396	11-12
Литол 24	0,135	0,847	10-11	0,084	0,510	11
	Образец с покрытием меди					
Масло И – 20А	0,292	0,855	9	0,15	2,189	10
Литол 24	0.073	0,833	11	0,116	1,298	10-11

Цель исследования: проведение оценки состояния, состава и строения структуры покрытия меди и медно-цинкового покрытия типа «латуни», а также описание механизма влияния особенностей формирования покрытий на взаимодействие пар трения скольжения и массоперенос компонентов покрытия.

Режимы нанесения покрытия и методы исследования.

На образец из стали 40Х наносится покрытие с помощью установки ДИМЕТ-405 при скорости перемещения сопла относительно образца 10 мм/с и расстояния от сопла до поверхности напыления 10 мм. Применяли механическую смесь частиц меди и корунда в соотношении Cu:Al₂O₃=55:45 (масс%), цинка и корунда в соотношении Zn:Al₂O₃=55:45 (масс%) и меди, цинка и корунда в соотношении Cu:Zn:Al₂O₃ = 35:35:30

(масс%) при этом температура потока воздуха составляла 270°, 360°, 450° [7].

Перемещение сопла вдоль края образца позволяет получить слой металла шириной $\approx 5,5$ мм, имеющего в сечении вид сегмента окружности. Сопло выводится за периметр поверхности образца и затем смещается на расстояние $L=2$ мм (перекрытие $\approx 64\%$) относительно ранее нанесённого слоя металла, после чего при обратном ходе сопла наносится следующий слой (рис.1) [6]. Толщина покрытия зависит от физико-механических свойств наносимого металла и температуры напыления и находится в пределах 150-450 мкм и для получения достаточной для проведения исследований и испытаний толщины покрытия (≥ 1 мм) напыление проводится многократно за счёт нанесения слоев друг на друга (циклов напыления) (рис.1).

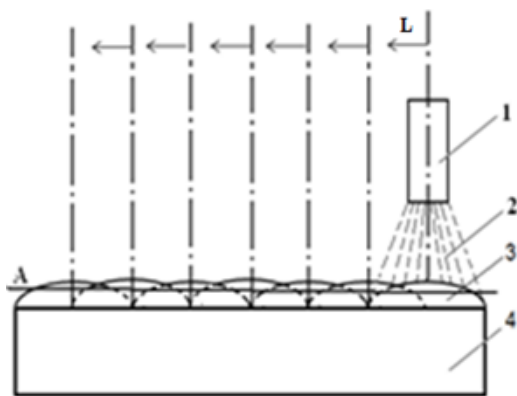


Рис. 1. Принципиальная схема нанесения покрытия: Вид сбоку: 1- сопло; 2 – поток частиц; 3 – нанесенный слой; 4 – подложка; А – уровень механической обработки нанесённого слоя металла

Фазовый состав покрытий исследовали на дифрактометре Rigaku Ultima IV на Cu-K α излучении. Анализ дифрактограмм осуществляется на основе программного продукта PDXL (Rigaku) с использованием базы данных PDF-2. Количественный анализ проводится с использованием метода Ритвелда, реализованного в пакете программ PDXL (Rigaku).

Рентгенофлуоресцентный анализ осуществляется на спектрометре Rigaku PrimusII с использованием в качестве источника рентгеновского излучения рентгеновской трубки с Rh-анодом, в вакууме и диапазоне элементов от Ca до U. Количественный анализ проводится после записи и расшифровки экспериментальных спектров от исследуемых образцов с помощью специального программного обеспечения фирмы Rigaku ZSX методом фундаментальных параметров SQX (без использования эталонных образцов).

Изучение морфологии и элементного состава покрытия проводится на сканирующем электронном микроскопе FEI «Quanta-650» с энергодисперсионным рентгеноспектральным анализатором EDAX. В исследовании используется детектор обратноотраженных электронов, позволяющий получать изображение с контрастом по атомному номеру и визуализировать различные фазы на поверхности образцов. Источником электронов в микроскопе служил вольфрамовый катод, ускоряющее напряжение составляет 25 кВ.

Литературный анализ. С помощью методов рентгеноструктурного анализа определить состояние, состав и строение структуры покрытия меди и медно-цинкового покрытия типа «латуни». Дать описание влияния механизма формирования покрытий на взаимодействие пар трения скольжения и массоперенос компонентов покрытия.

Рентгеноструктурный фазовый анализ покрытий на основе механической смеси частиц меди, цинка, а также этих металлов и корунда нанесённых при 360° показывает, что основной фазой в покрытии меди является чистая медь, то есть содержание оксида алюминия не превышает 1% [6,8]. У покрытия цинка и медно-цинкового покрытия содержание – массовая доля корунда практически не отличается и составляет $5,6 \pm 0,7\%$ и $5,3 \pm 1,4\%$ соответственно. Таким образом, выявлено, что данное напыление может оказывать значительное влияние на триботехнические характеристики медно-цинковых покрытий по сравнению с покрытиями меди и интенсивность изнашивания сопряжённых поверхностей пары трения. Более того, можно предположить, что цинк, который при нормальной температуре имеет низкие механические свойства ($\delta=30\%$, $\sigma_b=120$ МПа) не сможет «удержать» частицы корунда под воздействием сопряжённой поверхности и они, отделившись от поверхности покрытия, могут оказать значительное влияние на целостность сопряжённой поверхности и пары в целом [9]. Рентгеноструктурный фазовый анализ также выявляет в медно-цинковом покрытии твёрдые растворы электронного типа на базе CuZn $_3$ (ϵ -фаза) с массовой долей до 12,6% и на базе Cu $_5$ Zn $_8$ (γ -фаза) с массовой долей 17,0%, присущие латуням, что связано с диффузией меди в цинк и её модификацией [6,10].

Поверхность покрытия, нанесённого на основе смеси частиц меди и корунда при температуре 360°C, после механической обработки на наждачной бумаге разной зернистости и полировке на сухке с использованием суспензий: визуально 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 могут сформироваться в процессе напыления, так как открытая пористость покрытия составляет от 4% до 6% в зависимости от температуры напыления, но, в основном, их возникновение связано с устранением частичек корунда при механической обработке покрытия [5]. Они значительно отличаются по размеру, но в основном их величина не превышает 2 мкм, и они функционально могут осуществлять роль ёмкостей-карманов для удержания смазочных сред. На поверхности можно наблюдать частицы корунда разной формы и незначительного размера, которые, можно предположить, основным объёмом закреплены в медной основе, а также тонкие фрагменты кристаллов оксида алюминия, размер которых не превышает 5 мкм.

На поверхности покрытия меди и цинка был проведён микрорентгеноспектральный анализ химического состава в точках, которые визуально не содержат частиц корунда, а также каких-либо дефектов. Результаты представлены в виде весового содержания и интенсивности линий спектра алюминия (оксида алюминия) в покрытиях меди и цинка (табл. 2).

Зона инициирования спектра для данного состава покрытия представляет собой окружность диаметром ≈ 2



мкм при глубине возбуждения, не превышающей 1-2 мкм. Таким образом, представленные результаты микрорентгеноспектрального анализа состава покрытия и содержание компонентов покрытия с интенсивностью линий имеют интегральную величину (табл. 2). Из результатов анализа состава покрытия на основе меди видно, что содержание алюминия (Al_2O_3) отличается достаточно значительно по местам инициирования спектра от 1,87 вес% (интенсивность 63,64, т.4, табл. 2) до 0,09 вес% (интенсивность 3,01, т.1, табл. 2). Результаты можно интерпретировать как спектр от нескольких частиц, возможно разного размера присутствующих в зоне инициирования, так и от одной частицы. Однако, рассматривая ряд интенсивностей (т.т.1,2,3,6,8,9), которые могли быть получены от частиц примерно одного размера с учётом их закрепления основным объёмом - размером в медной основе, можно предположить, что при возбуждении остальных спектров таких частиц на площади инициирования спектра было больше, а именно в т.т.5 и 7 – 3-4 частицы и в т.4 – 10-12 частиц. Таким образом, можно сделать вывод, что распределение частиц корунда по площади

покрытия меди достаточно неравномерно, что может оказать влияние на работу сопряжённой пары трения.

Если соотнести площадь, занимаемую медью и алюминием к величине весовой компоненты каждого компонента и, соответственно, интенсивностью линий спектра, то можно оценить величину (размер) площади, занимаемой частицами корунда. Рассчитывая пропорциональную зависимость интенсивности спектра металлов от площади поверхности, занимаемой медью и алюминием получаем, что величина (площадь) частицы корунда не может превышать 0,05 мкм². Как видно из результатов проведённого анализа, частицы корунда размещены в покрытии неравномерно, закреплены достаточно надёжно в покрытии меди, а иначе были бы удалены при механической обработке и должны незначительно выступать над поверхностью за счёт удаления более мягкой основы металла. Таким образом, покрытие представляет собой шлифовально – полировальный инструмент, который при приложении нагрузки и движении пары трения «выглаживает» микронеровности поверхности контртела из стали ШХ15, что сопровождается значительным улучшением качества поверхности, что было отмечено ранее (табл.1).

Таблица 2

Результаты микрорентгеноспектрального анализа покрытия на основе меди и цинка			
Содержание алюминия, % в покрытии			
меди		цинка	
Весовое	Полная интенсивность	Весовое	Полная интенсивность
0,09	3,01	14,12	520,78
0,17	5,58	3,49	96,64
0,19	6,21	1,08	29,05
1,87	63,74	8,87	299,50
0,49	15,94	8,75	219,00
0,16	5,31	1,26	33,41
0,54	18,13	0,64	33,41
0,23	7,54	0,77	22,09
0,17	5,55	-	-

При взаимодействии сопряжённой пары трения, а именно покрытия меди с контртелом из стали ШХ15 термически обработанной на твёрдость 60-62 HRC в предварительный контакт вступают две псевдоповерхности – одну из них составляют частицы корунда выступающие над поверхностью покрытия, а вторую – вершины профиля микронеровностей (R_a и R_t). По твёрдости оксид алюминия уступает только алмазу и, поэтому при нагружении пары и смещении поверхностей относительно друг друга частицы корунда врезаются в вершины микронеровностей на глубину выступающих частиц корунда, что значительно меньше параметров R_a и R_t , таким образом, улучшая качество поверхности. Остальная и, возможно, весьма значительная часть вершин микронеровностей, не подвергшихся механическому воздействию частиц корунда, как инструмент врезается в поверхность покрытия меди и срезает слой металла, который остаётся на поверхности контртела, повышая его массу. При этом, за счёт съёма части поверхности металла покрытия увеличивается размер выступающей над поверхностью части частиц корунда с уширением их у основания.

В последующем, при взаимодействии сопряжённой пары, более значительно выступающие частицы корунда, оказывают существенное влияние на формирование профиля поверхности контртела, что может сопровождаться обратным переносом на покрытие не только микрообъёмов меди, ранее «захваченных», но и некоторых частей стальных фрагментов микронеровностей контртела, тем самым изменяя массу образца с покрытием. Результат этого процесса ещё в большей степени позволяет сформировавшемуся микрорельефу поверхности контртела механически воздействовать на покрытие меди и «захватывать» - переносить более значительную массу меди, что уже может позволить сформироваться тонкой плёнкой металла, возможно не на всей поверхности контртела, достаточно надёжно закреплённой в углублениях микрорельефа поверхности (R_a и R_t). Следует отметить, что при механическом воздействии частиц корунда на термически обработанную поверхность контртела и её «разрушении» от воздействия частиц корунда энергия будет увеличиваться, что будет способствовать созданию более прочных связей частичек - микрообъёмов меди с поверхностью контртела. Этим, в

принципе, заканчивается процесс приработки поверхностей пары трения и в дальнейшем сформировавшаяся плёнка покрытия меди на контртеле, будучи поверхностью – псевдоповерхностью контртела с остатками выступающего микрорельефа вступает в контакт с частицами корунда, которые её деформируют – «вспучивают», создавая некую новую псевдоповерхность, вступающую в контакт с покрытием, что может способствовать переносу уже незначительных микрообъёмов меди на поверхность покрытия и затем обратно. Данный механизм рассмотрен и представлен как некий последовательный процесс, однако из-за того, что частицы корунда распределены по площади покрытия неравномерно, и они могут выступать над поверхностью на разную высоту, то перенос массы металлов должен носить последовательно – параллельный характер и его функционирование, может быть, не связано с наличием какой-либо смазочной среды.

2. Методика исследования

Влияние количества частиц и их размеров на качество сопряжённой поверхности, то необходимо рассмотреть два механизма, которые могут оказать влияние на характер изменения микрогеометрии поверхности контртела и его износ. В медно-цинковом покрытии, в отличие от покрытия меди, визуально можно отметить достаточно многочисленные частицы корунда разной формы и размера. Причём, между этими частицами и матрицей – основой имеется некоторый разрыв – зазор, что можно интерпретировать как не слишком надёжное их закрепление в покрытии. В покрытии частицы цинка и меди размещены хаотично и, в той или иной степени могут чередоваться по отношению к направлению перемещения сопряжённых поверхностей и если частицы корунда, размещённые в частицах цинка с размером занимаемой площади до 0,5 мм², могут искажать профиль поверхности, ухудшая качество, то частицы корунда меньшего размера 0,05 мм² закреплённые надёжно в частицах меди могут и будут залечивать дефекты, не давая снижаться качеству, что и наблюдается при проведении испытаний медно-цинкового покрытия на трение [11]. Кроме того, при рассмотрении работы пары трения следует учитывать, что содержание цинка и меди зависит от температуры и продолжительности напыления (количества циклов), что связано с энергетическими особенностями метода газодинамического напыления и, например при температуре напыления 270°C массовая доля цинка может составлять порядка 10% [12, 13]. И, в этом случае, за счёт повышения содержания количества частиц меди с мелкими частицами корунда (0,05 мм²) способных эффективно «залечивать» дефекты, нанесённые крупными частицами корунда, находящимися в частицах цинка, можно даже рассчитывать на повышение качества поверхности контртела и пары в целом, как это было выявлено при испытании покрытия меди в паре со сталью ШХ15 (табл. 1).

При отрыве от поверхности покрытия крупных частиц корунда размером до 10 мкм и оценки возможности их воздействия на поверхность пары трения можно рассмотреть следующий механизм. При нанесении покрытия с использованием механической смеси частиц меди, цинка и корунда методом

газодинамического напыления проходит модификация частиц цинка за счёт диффузии меди, в результате чего формируются фазы присущие латуни. Модификация структуры цинка зависит от параметров напыления (температуры, продолжительности) и состояния структуры, включая величину микродеформаций и, соответственно скорости диффузии [6, 13]. Оторвавшаяся от поверхности напыленного слоя металла частица корунда, перемещаясь по поверхности медно-цинкового покрытия, может встретиться с частицей меди, чистого и модифицированного цинка деформируя и/или разрушая её, в зависимости от механических свойств металлов. Предел прочности меди, в нашем случае, составляет 210-220 МПа при пластичности 38%, а цинка 120 МПа при пластичности 22% и можно допустить, что они не способны остановить перемещение твёрдой частицы [14]. Но, встречаясь с модифицированной частицей цинка, которая имеет переменный состав и свойства, частица оксида алюминия может вполне остановиться. При входе на модифицированную частицу цинка частица корунда начнёт испытывать увеличение сопротивления перемещению, так как прочность её 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 латуни марки Л63- Л59 [10]. Эта зона незначительна по величине – толщине и может существенно затормозить частицу корунда, но не остановить и тогда, преодолев это незначительное по величине препятствие, частица корунда попадает в область с содержанием меди 8-10 вес%, прочность которой составляет 20-30 МПа и разрушает её, тем самым, как-бы попадая в карман. 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 разрушать целостность поверхности пары трения.

Исследуемый способ получения медно-цинковых покрытий путем подбора оптимальных технологических параметров напыления сформировать покрытие с высокими трибологическими, коррозионными или механическими свойствами, что подтверждается проведенными исследованиями и демонстрирует, метод «холодного» газодинамического напыления, как современный перспективный способ формирования функциональных покрытий различного назначения на поверхности сплавов железо-углерод.

3. Заключение

В результате рентгеноструктурным фазовым анализом определено, что при напылении покрытия на основе механической смеси частиц меди и цинка методом холодного газодинамического напыления цинк является основным элементом «захватывающим» частицы корунда.

Цинк в покрытии типа «латуни», не сможет «удержать» частицы корунда под воздействием сопряжённой поверхности, что приводит к их отделению, отделившись от поверхности покрытия, они



оказывают значительное влияние на целостность сопряжённой поверхности и пары трения в целом.

На поверхности напыленного покрытия типа «латуни» существуют замкнутые полости (углубления) разной формы и протяжённости формируются в процессе напыления, их возникновение связано с устранением частичек корунда при механической обработке покрытия. Их величина не превышает 2 мкм, и они функционально могут осуществлять роль ёмкостей-карманов для удержания смазочных сред.

Распределение частиц корунда по площади покрытия меди достаточно неравномерно, что может оказать влияние на работу сопряжённой пары трения.

Предложены два механизма, которые могут оказать влияние на характер изменения микрогеометрии поверхности контртела и его износ.

Медно-цинковое покрытие типа «латуни» в среде индустриального масла в паре со сталью ШХ15 показывает низкую интенсивность изнашивания вплоть до эффекта безызносности без ухудшения качества поверхности пары трения.

Авторы благодарят д.т.н. профессора Л.И. Куксёнову за проведение испытаний медных и медно-цинковых покрытий, обсуждение и интерпретацию результатов.

Использованная литература / References

[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] 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.

[4] Погосян А.К., Оганесян К.В. Явление фрикционного переноса: основные закономерности и методы исследования. // Трение и износ. 1986. Т.7. №6. С. 998-1008.

[5] Архипов В.Е., Лондарский А.Ф., Москвитин Г.В., Пугачев М.С. Газодинамическое напыление: структура и свойства покрытий. М.: КРАСАНД, 2017. 240 с.

[6] Архипов В.Е., Муравьёва Т.И., Пугачев М.С., Шкалей И.В. Влияние технологических параметров газодинамического напыления на структурно - фазовые превращения в покрытии типа «латуни» // Упрочняющие технология и покрытия. 2020. №12. С. 554-560.

[7] Димет. Применение технологии и оборудования. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dimet-r.narod.ru/> - (Дата обращения 14.10.2024).

[8] Миркин Л.И. Рентгеноструктурный анализ. Индексирование рентгенограмм. Справочное руководство. – М., Наука, 1981, 496 с

[9] Гуляев А.П. Металловедение. М.: Металлургия, 1986, 566 с.

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

[11] 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, т39, №4, С. 24-29.

[12] Куксёнова 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. Материаловедение в машиностроении, 2025, №2 (164). С. 11-22

[13] Бокштейн Б.С. Диффузия в металлах. Изд 2-е. М.: URSS, 2019. 248 с.

[14] Колачев Б.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов / Колачев Б.А., Елагин В.И., Ливанов В.И. – М.: МИСИС, 2005. -432 с.

Информация об авторах/ Information about the authors

Москвитин Г.В. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН), Москва, Россия
E mail: GVMoskvitin@yandex.ru

Архипов В.Е. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН), Москва, Россия
E mail: GVMoskvitin@yandex.ru

Пугачев М.С. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН), Москва, Россия
E mail: GVMoskvitin@yandex.ru



1 section. Resource- and energy-saving construction materials and technologies

A. Adylkhodjayev, I. Kadyrov, O. Tukhtasinov, H. Sadykova

Study of Porous Structure of Concrete on the Basic of Polyfunctional Additive and Low-Active Mineral Filler.....7

Kh. Akramov, Sh. Rakhimov

Properties of fine-grained concrete from raw materials of our Republic.....10

I. Makhamataliev, R. Muminov, Sh. Uzakov

Optimization of the composition of fine-grained concrete reinforced with polypropylene fiber14

V. Soy, G. Nuriddinova

Critical analysis of modern technologies and formulations of non-autoclaved aerated concrete for production conditions in the Republic of Uzbekistan18

N. Takhirzhanov, A. Ismaylova

Vermiculite-based energy-saving concretes: experimental study of strength.....22

R. Auezbaev, P. Lepasbaeva

Structure of ceramic fragments with vermiculite additives in various forming methods.....27

M. Musazhonov, A. Ibadullaev, U. Chorshanbiev

Study of polymer compositions for pipe washing on the hydraulic transport of dispersed systems.....33

N.V. Drobchenko

The use of energy-efficient and environmentally friendly materials in modern construction.....37

G. Moskvitin, V. Arkhipov, M. Pugachev

Production of non-corrosive coatings based on copper and zinc by gas-dynamic method42

M. Mekhmonov

Theoretical and experimental studies of embankment reinforcement in the area where the railway roadbed meets the bridge.....48

V. Soy, U. Shermukhamedov, N. Mukhammadiev, Vang Meng, Zhao Yue

Fine-grained basalt-fiber concrete for reinforced concrete structures of formwork-free production52