

## Выводы

1. Принятая методика обработки и анализа результатов экспериментального исследования учитывает случайный характер изучаемого процесса, позволяет оценить степень тесноты и форму рассматриваемых зависимостей, разложить общую дисперсию параметров качества после данной операции на унаследованную с предыдущей операции (В) и сформированную на данной операции (А).

2. Все рассмотренные показатели качества поверхности зубьев цилиндрических шестерен ( $R_a$ ,  $H_\mu$ ) после ХТО (нитроцементации в безмуфельном агрегате) для изученных материалов (стали 25ХГТ, 20ХН3А) достаточно тесно взаимосвязаны с их исходными значениями (после шевингования) ( $r_{xy} = 0,32-0,67$ ) и эти взаимосвязи с достаточной точностью ( $\epsilon_{cp} = 10,38-12,4\%$ ) могут быть описаны полиномом первой степени.

3. Значения параметра шероховатости  $R_a$  поверхностей зубьев после ХТО достаточно тесно связаны с их исходными значениями ( $r_{xy} = 0,65 - 0,67$ ). Регулирование значений  $R_a$  после ХТО должно производиться как за счет оптимизации исходных значений (В = 42,2 – 55,1%), так и за счет управления процессом ХТО (А = 44,9 – 57,8%). ХТО незначительно увеличивает исходные значения  $R_a$  (в 1,01 – 1,07 раз).

4. Значения микротвердости  $H_\mu$  поверхности зубьев при ХТО значительно увеличиваются (в среднем на 326%) и менее тесно по сравнению с другими характеристиками качества поверхностей зубьев взаимосвязаны со своими исходными значениями ( $r_{xy} = 0,32 - 0,40$ ). Управление значениями  $H_\mu$  после ХТО следует осуществлять в основном за счет самого процесса ХТО (А = 74,0 – 90,0%). Оптимизация исходных перед ХТО значений  $H_\mu$  на 10,0 – 16,0% обеспечивает дисперсию  $H_\mu$  после ХТО.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кораблев А.И., Решетов Д.Н. Повышение несущей способности и долговечности зуб-передач. –М.: Машиностроение, 1968. –288с.

УДК 621.793

*Шелег В.К., Присевок А.Ф., Леванцевич М.А., Максимченко Н.Н.*

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И РАБОТОСПОСОБНОСТИ ПОКРЫТИЙ ИЗ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

*Белорусский национальный технический университет  
Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси  
Минск, Беларусь*

**Введение.** Порошковые материалы, получаемые методами порошковой металлургии, в отличие от литейных обладают рядом полезных и управляемых в определенных пределах свойств. К их числу относят пористость, твердость, тугоплавкость, особые триботехнические, электрические и магнитные свойства, экономичность и экологичность, что обуславливает широкое применение подобных материалов в машиностроении для изготовления изделий различного назначения, а также для нанесения функциональных покрытий [1]. Легирование металлических порошков компонентами твердой смазки (графитом, дисульфидом молибдена и т.п.), а также присадками, повышающими прочностные свойства материала, позволяет увеличить срок их службы в несколько раз. Для формирования покрытий из порошковых материалов используют такие способы, как газопламенное, плазменное и детонационное напыление, электроконтактное, электроимпульсное, индукционное припекание, электродуговая и индукционная наплавка. Однако большинство из этих методов обладает значительной энергоемкостью, требуют

проведения дополнительных операций по подготовке поверхности и последующей обработке сформированного покрытия, что отрицательно сказывается на себестоимости покрытия. Перспективным методом формирования покрытий, лишенным указанных недостатков, является метод плакирования гибким инструментом (ПГИ), основанный на взаимодействии вращающейся металлической щетки с материалом покрытия и поверхностью обрабатываемой детали [2, 3]. Однако данных о возможности формирования покрытий из порошковых материалов и их работоспособности в известных публикациях не приводится.

**Цель работы** заключалась в исследовании структуры и работоспособности покрытий, сформированных методом ПГИ из порошковых композиционных материалов.

**Методики исследований.** Для нанесения покрытий в качестве доноров использовали полученный методом экструзии брусок из меди М1, легированной ультрадисперсной алмазнографитной шихтой УДАГ (ТУ РБ 28619110.001-95) производства фирмы «Синта» (РБ), в количестве не более 1 мас. %, и брусок из спеченной бронзы BrO5C25, легированной графитом, в количестве 1 мас.%, и дисульфидом молибдена, в количестве 0,5 мас. %. Размерность зерен алмазнографитной шихты составляла 4...6 нм, графита и дисульфида молибдена - 1..5 мкм.

Нанесение покрытий осуществляли проволочной щеткой диаметром 150 мм, с вылетом и диаметром ворса соответственно 22 и 0,25 мм. Линейная скорость вращения щетки составляла 35,0...38,0 м/с. Покрытия наносили на плоские поверхности дисков-образцов из стали 08кп (90 HV). При этом формировали как однослойные, так и двухслойные покрытия. Ранее выполненные исследования показали, что нанесение дополнительного слоя из антифрикционного сплава с компонентами меди, олова, свинца и цинка (например, баббита) способствует снижению коэффициента трения и времени приработки сопряжения [4]. В связи с этим в настоящих исследованиях поверх нанесенных слоев из вышеуказанных материалов наносили слой из баббита, легированного частицами графита. После нанесения покрытий дополнительной механической обработки не проводилось. Среднее значение параметра шероховатости  $R_a$  поверхности образцов с покрытиями составляло 0,55...0,9 мкм. Толщина покрытий составляла 4...5 мкм.

Работоспособность покрытий из порошковых материалов оценивали по критериям износостойкости и антифрикционности. Испытания на трение и изнашивание выполняли на установке, реализующей трение торцовых поверхностей трех роликов из стали ШХ15 (60...63 HRC) по плоской поверхности вращающегося диска из стали 08кп с нанесенными покрытиями. Скорость относительного скольжения трущихся поверхностей составляла 7 м/с. При этом сначала образцы прирабатывались в течение 30 мин при давлении  $p = 0,5$  МПа, затем выполнялось ступенчатое нагружение до возникновения заедания. До давления  $p = 1,5$  МПа величину силового воздействия на каждой ступени увеличивали на 0,5 МПа, а после – на 0,25 МПа. Продолжительность испытаний на каждой ступени нагружения составляла 5 мин. Смазывание дорожки трения на диске производили с помощью фитиля, пропитываемого (в ограниченном количестве) маслом М10В. Контурная площадь поверхности взаимного прилегания образцов при установке на машину трения согласно требованиям ГОСТ 23.224-86 составляла не менее 90 %.

В ходе испытаний на каждой ступени нагружения регистрировали момент трения, приrost температуры образца и контробразца от начала до завершения испытаний, а также весовой износ образца и сопряженных контробразцов, который затем пересчитывали в массовую интенсивность изнашивания.

Рентгеноструктурный анализ композиционных покрытий выполняли с помощью дифрактометра ДРОН-3.0. Рентгеновская съемка образцов проводилась с фокусировкой по Бреггу-Брентано в режиме сканирования (по точкам) с шагом  $0,1^\circ$  и временем набора импульсов на точку, равным 40 с. Для фазового анализа использовалась стандартная картотека PDF. При определении величины физического уширения дифракционных линий матричной фазы  $\beta$ , связанной с плотностью дефектов кристаллической решетки в поверхностных слоях, использовался метод аппроксимации [5].

Определение напряжений в плакированном слое проводилось методом рентгеновской тензометрии с использованием способа наклонной съемки [5]. Окончательный расчет напряжений  $\sigma_\varphi$  проводился по формуле:

$$\sigma_{\varphi} = \frac{E}{1+\mu} \frac{d_{\varphi} - d_0}{d_0}$$

где  $E$  – модуль упругости,  $\mu$  – коэффициент Пуассона,  $\varphi$  – угол наклона,  $d_{\varphi}$  – межплоскостное расстояние для дифракционных линий (222) плакированной меди и (220) – стальной подложки, снятых под углами  $\varphi = 0, 20, 40$  и  $50^\circ$ ,  $d_0$  – межплоскостное расстояние для дифракционных линий (222) и (220), снятых под углом  $\varphi = 0^\circ$ . Значения модулей упругости для меди и железа брались равными соответственно 122 и 220 ГПа. Коэффициент Пуассона для меди и железа принимался равным 0,3.

**Анализ полученных результатов исследований.** Исследование структуры и фазового состава сформированного покрытия из легированной УДАГ меди выявило следующее. Период кристаллической решетки плакированной меди составляет 0,3610 нм. Металлоплакированный слой содержит медь, графит и ультрадисперсные алмазы (рис. 1).

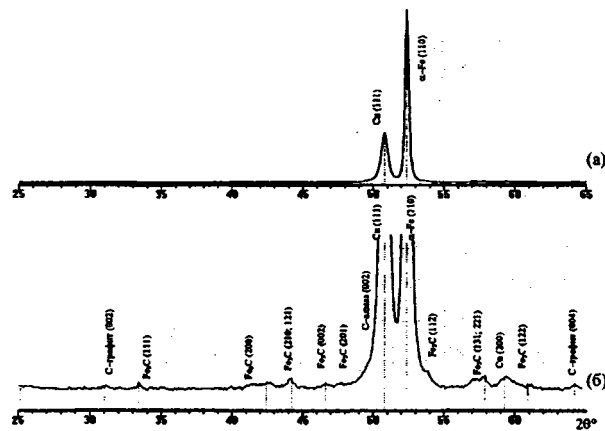


Рис. 1. Фрагменты рентгеновских дифрактограмм (CoK $\alpha$ ) от поверхностных слоев стали, плакированной покрытием Си-УДАГ, в масштабе 1:1 (а) и в масштабе 1:10 (б)

Из приведенной на рис. 1 рентгеновской дифрактограммы от поверхностного слоя плакированного материала можно видеть, что содержание модифицирующей алмазнографитной добавки УДАГ в нанесенном слое невелико. Кроме этого, на дифрактограмме регистрируются сильные линии от  $\alpha$ -Fe и слабые рефлексы отраженного рентгеновского излучения от частиц карбида  $Fe_3C$ , принадлежащие стальной подложке, на которую нанесен плакирующий слой. Дифракционные линии меди в плакированном слое весьма сильно уширены по сравнению с исходной отожженной медью (рис. 2),

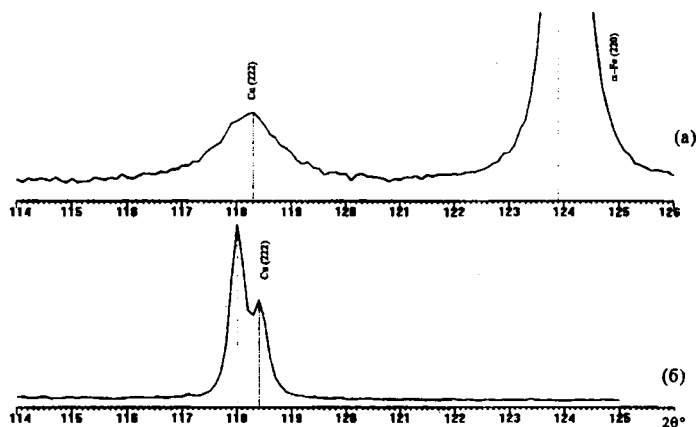


Рис. 2. Фрагменты рентгеновских дифрактограмм (CoK $\alpha$ ) от поверхностных слоев метало-плакированной стали (а) и отожженной меди М1 (б)

что указывает на существенное увеличение плотности дефектов кристаллической решетки и измельчение структуры в плакированной меди. В частности, значения физического уширения дифракционных линий (111) и (222) плакированной меди составляют соответственно  $\beta_{(111)} = 11,2 \cdot 10^{-3}$  и  $\beta_{(222)} = 24,9 \cdot 10^{-3}$  рад.

Вместе с тем, регистрируемая в эксперименте величина отношения  $\beta_{(222)} / \beta_{(111)} \cong 2,2$  достаточно близка к величине отношения  $\sec\theta_{(222)} / \sec\theta_{(111)} \cong 1,8$ , что свидетельствует о преимущественно коррелированном расположении дислокаций в виде стенок, образующих границы блоков или субзерен [5] в медной пленке. Последнее позволило рассчитать размер ячеек (блоков)  $D$ , формирующихся в медной пленке при ее намазывании щеткой на сталь. Значение  $D$ , оцененное по величине  $\beta_{(222)}$ , составляет 16–20 нм, что свидетельствует о формировании ультрадисперсной структуры в плакированном слое.

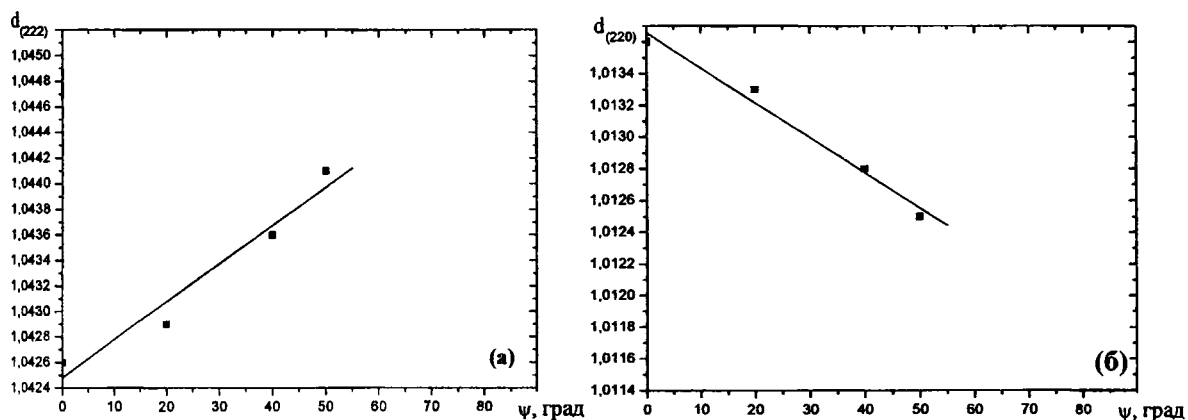


Рис.3. Зависимость межплоскостных расстояний  $d_{222}$  плакированной меди (а) и  $d_{220}$  стальной подложки (б) от угла наклонной съемки

На рис. 3 приведены экспериментальные зависимости межплоскостных расстояний, определенных по линиям (222) для плакированной меди и (220) для стальной подложки, в зависимости от угла  $\psi$  при наклонной съемке. Можно видеть, что при увеличении угла  $\psi$  межплоскостные расстояния для меди и стальной подложки изменяются различным образом, что свидетельствует о различии в упруго-напряженном состоянии подложки и плакированной медной пленки. Результаты расчетов показывают, что в плакированном слое меди, легированной УДАГ, сформированы остаточные растягивающие напряжения  $\sigma\phi = 225$  МПа, а в поверхностном слое стальной подложки - остаточные сжимающие напряжения  $\sigma\phi = -280$  МПа.

Указанный факт позволяет использовать покрытие в качестве барьерного слоя между подложкой и сопряженной деталью, обеспечивая мягкий режим работы сопряжения за счет демпфирования возникающих в процессе работы колебаний. Триботехнические испытания пар трения с однослойными и двухслойными покрытиями из композиционных порошковых материалов показали, что покрытия из материалов, легированных УДАГ, а также компонентами твердой смазки (графитом и дисульфидом молибдена) способствуют снижению коэффициента трения и повышению нагрузочной способности поверхностного слоя трущихся деталей, по сравнению с образцами без покрытия (рис. 4).

Критическая нагрузка, при которой произошло схватывание и заедание образцов с двухслойным покрытием, состоящим из последовательно нанесенных слоев меди М1, легированной УДАГ, и баббита, легированного графитом, составила 5,26 МПа, что в 2 раза превышает критическую нагрузку образцов без покрытия. Коэффициент трения при этом уменьшился в 3,0...3,3 раза.

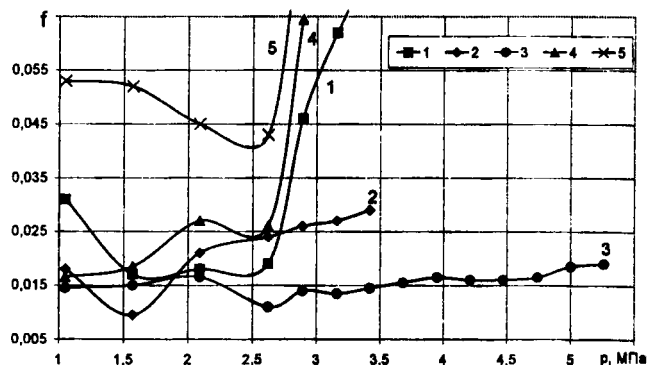


Рис. 4. Зависимость коэффициента трения от нагрузки для пар трения с испытываемыми покрытиями:

- 1 – покрытие MI+УДАГ; 2 – покрытие BrO5C25+C+MoS2;  
 3 – покрытие (MI+УДАГ)-(бabbит+C);  
 4 – покрытие (BrO5C25+C+ MoS2)-(бabbит+C); 5 – без покрытия

Легирование покрытия из бронзы частицами графита и MoS<sub>2</sub> способствовало созданию благоприятных условий трения, в результате чего коэффициент трения уменьшился в 1,8...2 раза, а нагрузочная способность повысилась в 1,3 раза, по сравнению с образцом без покрытия. Нанесение поверх слоя покрытия из бронзы BrO5C25, легированной графитом и дисульфидом молибдена, дополнительного слоя из легированного баббита способствовало снижению коэффициента трения в интервале нагрузок 1...2,5 МПа до 0,018...0,03, однако нагрузочная способность покрытия не увеличилась.

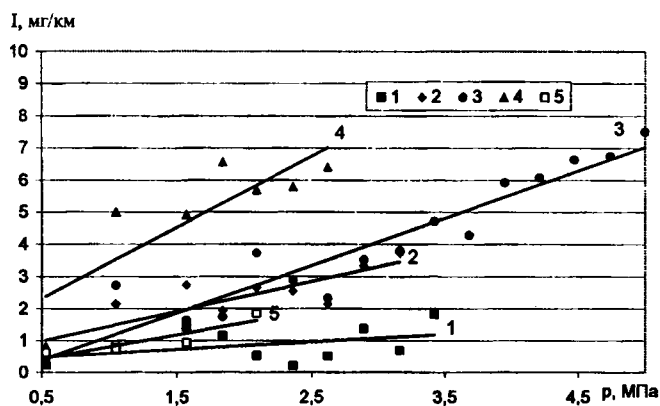


Рис. 5. зависимость интенсивности изнашивания сопряжения от нагрузки:

- 1 – MI+УДАГ; 2 – BrO5C25+C+MoS2; 3 – (MI+УДАГ)-(бabbит+C);  
 4 – (BrO5C25+C+ MoS2)-(бabbит+C);  
 5 – без покрытия

С ростом нагрузки интенсивность изнашивания испытываемых образцов (дисков и роликов) возрастает у всех пар трения (рис. 5). Меньшую интенсивность изнашивания имеют пары трения с однослойным и двухслойным покрытием с УДАГ-наполнителями.

Однако анализ изнашиваемости контрообразцов (роликов) в процессе испытаний показал, что в некоторых случаях их износ, несмотря на более высокую твердость, превышает износ дисков с покрытием. У наилучшего, с точки зрения триботехнических характеристик, двухслойного покрытия (MI+УДАГ)-(бabbит+C) износ роликов намного превышает износ дисков. Это дает основание предположить, что наноразмерные наполнители из УДАГ шаржируют поверхность диска и, вследствие высокой твердости, подобно микрорезцам режут трущиеся поверхности роликов.

**Заключение.** Результаты исследования структуры и фазового состава покрытий, сформированных методом ПГИ из порошковых материалов, легированных наноразмерными фазами

из неметаллических компонентов, подтверждают наличие неметаллических компонентов в составе модифицированного поверхностного слоя. Однако их содержание в этом слое невелико и составляет примерно 35...45 % от количества в исходном материале. В результате обработки вращающейся металлической щеткой в плакированном поверхностном слое формируются остаточные напряжения растяжения величиной  $\sigma_f = 225$  МПа, а в прилегающей к этому слою стальной подложке – напряжения сжатия величиной  $\sigma_f = -280$  МПа. Таким образом, упрочненная стальная основа обеспечивает высокую нагрузочную способность сопряжения, а пластичное покрытие служит барьерным слоем между подложкой и сопряженной деталью.

Значительного снижения коэффициента трения скольжения и повышения нагрузочной способности поверхностного слоя можно добиться, используя двухслойные покрытия из последовательно нанесенных слоев меди М1, легированной ультрадисперсной алмазнографитной шихтой УДАГ, и легированного частицами графита баббита. По сравнению с парой трения без покрытия, подобные покрытия в 3,0...3,3 раза снижают коэффициент трения скольжения и в 2 раза повышают нагрузочную способность сформированного слоя. Однако в случаях, когда условия работы пары трения не допускают чрезмерного износа сопряженной детали, целесообразно использовать покрытия из бронзы, легированной компонентами твердой смазки. Для пары трения, работающих при удельных давлениях до 3,5 МПа, высокую износостойкость обеспечит однослойное покрытие из меди М1, легированной УДАГ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Металлические порошки и порошковые материалы: справочник / Б.Н. Бабич [и др.] ; под ред. Ю.В. Левинского. – М.: ЭКОМЕТ, 2005. – 520 с.
2. Белевский, Л.С. Пластическое деформирование поверхностного слоя и формирование покрытия при нанесении гибким инструментом / Л.С. Белевский. - Магнитогорск: Изд-во Магнитогор. лица РАН, 1996. – 230 с.
3. Анцупов, В.П. Теория и практика плакирования изделий гибким инструментом / В.П. Анцупов. – Магнитогорск: МГТУ, 1999. - 242 с.
4. Леванцевич, М.А. Повышение эксплуатационных свойств трибосопряжений нанесением покрытий металлическими щетками / М.А. Леванцевич, Н.Н. Максимченко, В.Г. Зольников // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. Навук. - 2005. - № 1. - С. 67-72.
5. Горелик, С.С. Рентгенографический и электронно-оптический анализ: учеб. пособие для вузов / С.С. Горелик, Ю.А. Скаков, Л.Н. Расторгуев. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: МИСИС, 2002. – 360 с.

УДК 620.16

*Беляев Г.Я., Ильясевич Е.Г.*

#### КОМПЛЕКСНЫЙ РАЗМЕРНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ФЛАНЦА

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь*

Комплексный размерный анализ технологического процесса изготовления фланца включает в себя размерный анализ по линейным размерам и расчет эксцентриситетов припусков обрабатываемых поверхностей с помощью теории графов.

Целью проведения размерного анализа технологического процесса по линейным размерам является определение промежуточных и окончательных размеров с допусками на них, обеспечивающих заданную чертежом точность конструкторских размеров и предельных значений припусков. Расчет эксцентриситетов припусков позволяет определить допустимые радиальные биения и проверить, обеспечивают ли полученные значения выполнение требований заданных чертежом.