

УДК 621.793

## ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИМИ КАРБИДНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ МЕТОДОМ ЭКЗОТЕРМОРЕАКЦИОННОГО ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО УПРОЧНЕНИЯ

*д-р техн. наук, проф. О.П. РЕУТ, канд. техн. наук, доц. В.А. КОВАЛЬ, В.В. САРАНЦЕВ  
(Институт повышения квалификации и переподготовки кадров  
Белорусского национального технического университета, Минск)*

*Рассмотрены способы нанесения исходной шихты на детали с различными контурами поверхностей. Проведен анализ свойств тугоплавких соединений и отобраны 2 состава смесей: TiC/(Ni - Cr - B - Si) 10 % и TiC/(Co - Cr - B - Si) 10 %. Проведены испытания выбранных покрытий на износостойкость. Исследована целесообразность предварительного активирования шихты и поверхности основы.*

**Проблема надежности и долговечности деталей машин, выбор и обоснование технологии восстановления деталей машин.** Одной из главных задач научно-технического прогресса является внедрение в промышленность технологических процессов, обеспечивающих повышение производительности труда и увеличение коэффициента использования материалов, уменьшение энергоемкости и себестоимости изделий [1]. Статистика свидетельствует, что более 80 % машин и механизмов отказывают в результате изнашивания деталей, работающих в условиях трения (подшипников, цапф, деталей уплотнений и т.д.). Технический прогресс, связанный в первую очередь с повышением производительности оборудования, и как следствие, с повышением скоростей и нагрузок узлов трения, требует внедрения новых более износостойких материалов. Поэтому разработка антифрикционных и износостойких материалов и технологий их получения, а также нанесения покрытий на их основе является в настоящее время актуальной.

Наиболее часто встречаемая причина отказа узлов и механизмов - износ цилиндрических поверхностей деталей до 0,6 мм, причем более 50 % этих деталей имеют износ до 0,1 мм. Для восстановления работоспособности деталей в таком диапазоне износа наиболее подходящими и близкими по энергетическим параметрам методами являются: электроконтактное припекание металлических порошков, лазерная наплавка, электромагнитная наплавка, электроискровая наплавка. Однако у этих методов есть ряд недостатков:

- электроконтактное припекание металлических порошков происходит с большими энергетическими затратами, идущими на нагрев порошкового слоя до высокой температуры (0,9...0,95 температуры плавления порошка) и приложению давления (до 100 МПа) [9];
- при лазерной наплавке возникают трещины в наплавленном слое (оборудование достаточно дорогостояще) [8];
- при электроискровой наплавке требуются большие потоки энергии для расплавления твердосплавных электродов и материала детали;
- для электромагнитной наплавки [1] необходимы порошки на железной основе, обладающие магнитными и токопроводящими свойствами.

Для восстановления и упрочнения деталей машин весьма перспективными являются электрофизические методы, основанные на использовании концентрированных потоков энергии. Экзотермореакционное электроискровое упрочнение (ЭТРЭУ) является одним из таких методов. Оно позволяет реализовать восстановление геометрических размеров и увеличение срока службы деталей за счет упрочнения - повышения износостойкости рабочей поверхности. Метод основан на использовании тепловой энергии, выделяющейся при протекании экзотермической реакции в предварительно нанесенном слое реагентов на восстанавливаемую рабочую поверхность детали, и электрической, необходимой для инициирования реакции.

Основные особенности ЭТРЭУ:

- возможность локальной обработки поверхности (наплавку можно осуществлять в строго определенном месте, не защищая остальную поверхность детали);
- отсутствие перегрева детали в процессе обработки;
- высокая прочность сцепления нанесенного материала с основой;
- отсутствие необходимости специальной предварительной подготовки обрабатываемой поверхности;
- возможность наносить покрытия как на тела вращения, так и на плоские.

Технология нанесения покрытий заключается в следующем: слой реагентов наносится на подготовленную поверхность подложки в виде приготовленной жидкой суспензии несколькими методами (рис. 1). Основное назначение этой операции - формирование на покрываемой поверхности заготовки слоя, из которого в процессе последующей обработки образуется покрытие. На покрываемой поверхности должен быть создан слой со свойствами, обеспечивающими целостность его как в подготовительном периоде, так и в процессе обработки. Исходная смесь порошков наносится на предварительно подготовленную поверхность, имеющую шероховатость, соответствующую чистовой токарной обработке для грубых покрытий или шлифовке - для тонких. Толщина слоя исходной смеси определяется необходимо-

стью нанесения покрытия заданной толщины и должна соответствовать выбранному режиму обработки. После нанесения смеси поверхность должна быть высушена. Время окончания сушки определяется визуально (поверхность нанесенного исходного слоя становится светлее по сравнению со свежееизготовленной).



Рис. 1. Классификация способов нанесения сырого слоя

Важным также является выбор связующего вещества для приготовления пасты. Хорошие результаты получены при использовании паст на нитроцеллюлозной основе с небольшим содержанием сухого остатка (цапонлак, клейстер).

**Выбор материала с необходимыми свойствами и структурой.** *Керамические материалы* благодаря своей сверхвысокой твердости, низкой плотности, повышенной коррозионной стойкости и термостойкости, технологичности, хорошим антифрикционным свойствам в последние десятилетия XX века являются предметом большого числа трибологических исследований и практических разработок [2, 3]. Наибольшее внимание уделяется материалам на основе карбидов кремния, титана и вольфрама, оксидов алюминия и циркония, нитридов кремния и бора [4]. Проведенные исследования позволили установить существенное влияние твердости керамики на ее износостойкость [5]. Изучение свойств тугоплавких соединений титана, ванадия, хрома, молибдена, вольфрама, алюминия и никеля позволило значительно сузить круг материалов, перспективных для создания износостойких покрытий методом совмещения процессов их синтеза и нанесения на основу. Предметом анализа являлись термодинамические, кристаллохимические, механические свойства и смачиваемость. В плане повышения твердости, износостойкости наиболее перспективным представляется использование карбидов, боридов, нитридов. Конкретные комбинации состава сплавов внедрения в качестве основы покрытий и металлов связок должны выбираться применительно к материалу основы и условиям эксплуатации изделий. Одной из отличительных особенностей экзотермических реакций является возможность синтеза и элементов и соединений сложного химического состава при возможности регулирования фазового состава и структуры.

**Целью исследований** являлась разработка технологии восстановления деталей, работающих при интенсивном износе.

**Методы исследований.** Для исследования стойкости покрытий к фрикционному износу испытания проводились по схеме диск - колодка. Схема испытаний показана на рис. 2. В качестве контртела применяли твердый сплав ВК-6.

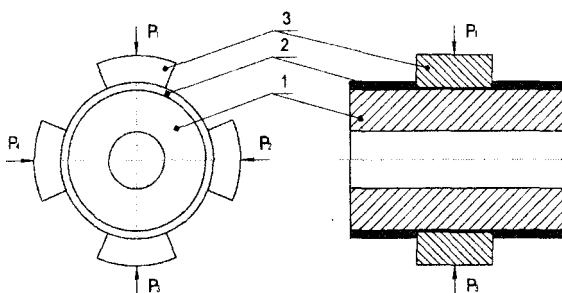


Рис. 2. Схема испытаний на износостойкость покрытий:  
1 - образец; 2 - покрытие; 3 - контртело

Испытания проводились с использованием головки трения, позволяющей одновременно изнашивать четыре образца с автономным нагружением каждого. Стальной ролик 1 с покрытием 2 вращался с угловой скоростью  $30 \text{ с}^{-1}$ , что при диаметре ролика 40 мм соответствовало скорости трения 0,6 м/с. Сегменты 4 контртела прижимались с постоянным усилием 50 Н, что создавало в зоне трения давление 0,5 МПа. Испытания проводились при трении без смазки.

Параметры износостойкости определялись независимыми измерениями потери массы ролика и сегмента на аналитических весах с точностью до 0,0001 г, а также измерением линейного износа с помощью индикаторной головки (с точностью до 0,01 мм).

**Результаты и обсуждения.** Присутствие в зоне реакции высоких температур и различных легирующих элементов, входящих в состав нанесенной шихты и электрода (анода), позволяет не только наращивать поверхность детали, но и легировать ее, улучшая физические и химические свойства металлических поверхностей.

Металлографические исследования проводились по стандартным методикам. Для каждого образца проводился точечный анализ по глубине слоя. При сканировании по глубине слоя наблюдается достаточно равномерное распределение титана в верхнем слое покрытия с резким уменьшением концентрации в переходной зоне (рис. 3). Железо достаточно равномерно распределено по глубине слоя и переходной зоны, что свидетельствует о его активной диффузии из матрицы в покрытие.



Рис. 3. Изменения концентрации в покрытии  $TiC/(Co - Cr - V - Si) 10\%$ :  
а – титана; б – железа

Структура поверхностного слоя после обработки, как правило, состоит из трех зон: 1 - зона образовавшегося покрытия (рис. 4); 2 -- переходный слой; 3 - основной материал. Максимальная толщина первой зоны достигает 400 мкм; минимальная - 20 мкм; переходный слой имеет толщину от 200 до 500 мкм.

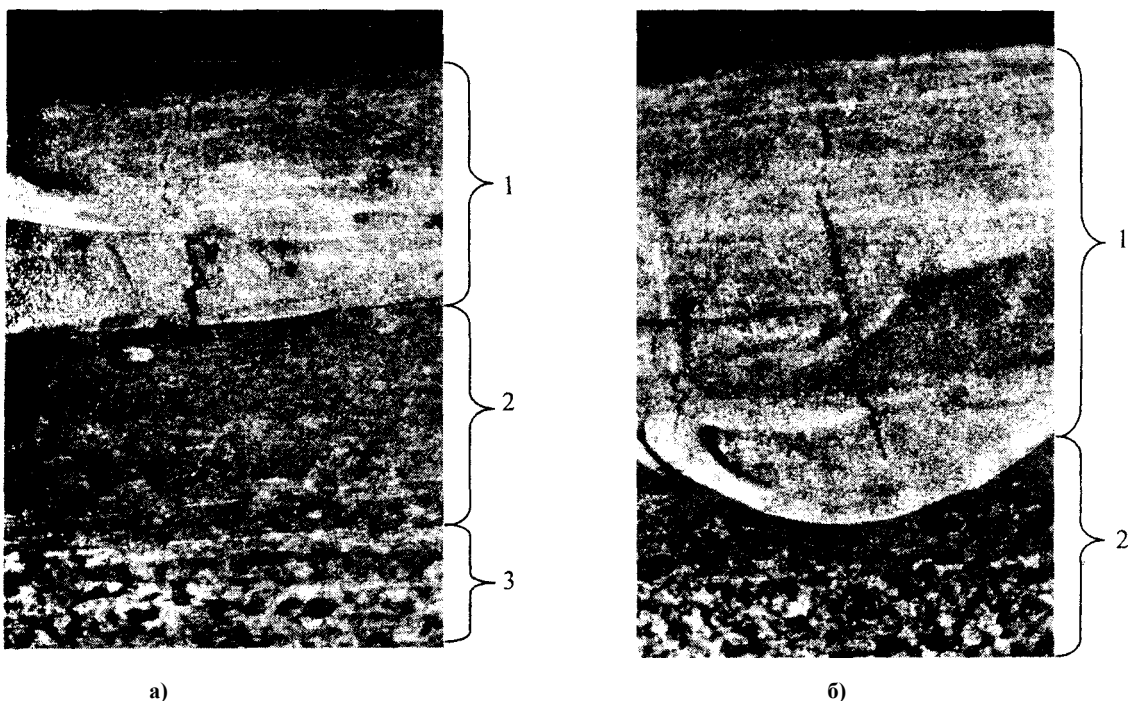


Рис. 4. Микроструктура стали 45 после экзотермоэлектроннолучевого упрочнения шихтой состава  $TiC/(Co - Cr - V - Si) 10\%$  и электродом марки «стеллит»  $\times 200$ :  
а - без предварительного активирования; б - после дробеструйной обработки  
1 - поверхностный слой; 2 - переходный слой; 3 - подложка

Поверхностный слой имеет наивысшую твердость и состоит из различного рода нитридов и карбидов. Например, верхний слой, образовавшийся в результате экзотермоэлектродного упрочнения шихтой состава Ti - сажа/(Co — Cr — В — Si) 10 мас. % и электродом марки «стеллит» стали 45, имеет микротвердость 23000...26000 МН/м<sup>2</sup>.

Ниже верхнего слоя находится зона термического влияния, которая в большинстве случаев имеет аустенитно-мартенситную структуру с включением мелкодисперсных карбидов, нитридов и карбонитридов.

Количество материала, наращиваемого на катоде, а следовательно, увеличение размеров детали зависит от толщины нанесенного слоя шихты и режимов обработки. При ручной обработке наиболее рационально выбирать режимы на основании предварительной пробы на образцах из того же материала, что и обрабатываемое изделие.

Для малогабаритного источника примерные режимы представлены в таблице.

Оптимальные режимы обработки

Требуемая толщина покрытия, мм	Толщина исходного слоя смеси, мм	Режим обработки, кГц
0,02... 0,05	0,05 ...0,1	40
0,05...0,1	0,1...0,25	30
0,1...0,2	0,3...0,4	
до 0,3	0,5 с добавками металла связи	20

Время нанесения покрытия при ручной обработке определяется визуально по следующим критериям:

- недостаточное время ведет к несплошности покрытия. Визуально несплошность наблюдается как наличие темных пятен (непрореагировавшая исходная смесь);
- избыточное время обработки приводит к уменьшению толщины покрытия (при снижении шероховатости);
- оптимальное время обработки - минимальное, достаточное для исчезновения непрореагировавших участков;
- время обработки при эквидистантном электроде определяют по уменьшению тока, изменению цвета искры, а при автоматическом отслеживании межэлектродного промежутка - при его уменьшении.

Для большинства металлов глубина зоны термического влияния увеличивается при применении более мощных электрических режимов и колеблется, как правило, в пределах 0,2...0,5 мм.

В зависимости от назначения покрытия, состава исходной смеси, режима обработки *сплошность покрытия* колеблется от 60 до 100 %. Наибольшей сплошностью обладают двухслойные покрытия с дополнительной обработкой электрода. Переходный слой в любом случае имеет 100 % сплошность и, как указывалось выше, различается только по толщине.

Профилографические исследования поверхности покрытий показывают, что в зависимости от режима обработки, главным образом от частоты импульса, можно получить шероховатость Rz 80...40. В целях снижения шероховатости повторную обработку целесообразно проводить при большей частоте и большей скважности (меньшей энергии обработки). Толщина слоя исходной смеси при этом должна быть в 1,5...2 раза меньше, чем толщина первого слоя.

Для снижения шероховатости целесообразно производить обработку чистовую за счет массопереноса электрода.

Таким образом, подбирая материал электрода можно добиться хорошей прирабатываемости деталей с покрытием или понижения шероховатости.

Также для снижения коэффициента трения целесообразно провести шлифование поверхности твердым мелкозернистым материалом, притереть медью, либо притереть контртелом с аналогичным покрытием.

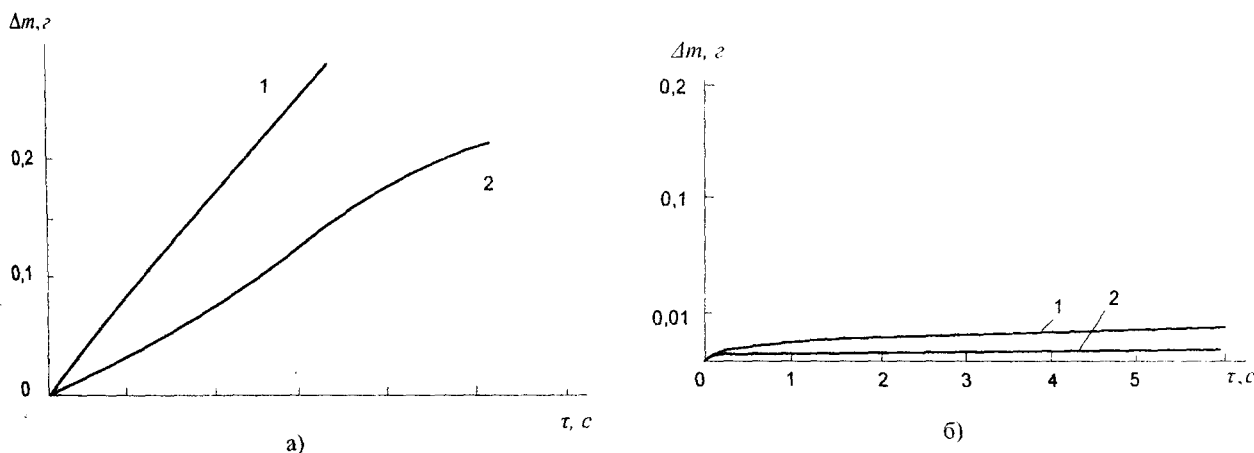
**Влияние предварительного активирования шихты и поверхности основы на свойства покрытий.** Методами рентгенофазового и дифференциально-термических анализов были изучены взаимодействия в системе Ti - сажа - (Co - Cr - В - Si) 10 мас. % при использовании механического активирования исходных компонентов в центробежной планетарной мельнице. Продолжительность механоактивации составляла от 0,5 до 5 мин при соотношении масс шаров и шихты 20:1. Установлено, что компоненты неактивированной шихты не реагируют до температуры 1000 °С; при нагреве предварительно активированной шихты температура начала взаимодействия снижалась до 600...650 °С. Тепловыделения при взаимодействии компонентов активированной шихты достаточно для самопроизвольного протекания реакции в режиме самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС-процесса).

**Активирование поверхности** предварительной дробеструйной обработкой заключается в изменении свойств поверхности, сопровождающемся возрастанием скорости взаимодействия, в первую очередь, его лимитирующей стадии - активации основы и ростом площади и объема химического взаимодействия материалов покрытия и основы. Эффект активирования проявляется в увеличении переходной (диффузионной) зоны - характеристики, важной для увеличения ресурса работы деталей с покрытиями.

Упрочнение металлов в процессе пластической деформации (наклеп) является следствием увеличения плотности дислокаций, количества двумерных и других дефектов, что сопровождается изменением как физико-механических свойств, так и общей химической активности металлической поверхности. Полученные результаты свидетельствуют об эффективности предварительной пластической деформации, что можно объяснить тем, что она служит фактором накопления свободной энергии поверхностного слоя подложки. Вместе с тем существует оптимум величины степени пластической деформации. Дальнейшее увеличение этого параметра сопровождается интенсификацией разрушения основы, в результате чего уменьшается накопленная ею энергия. После предварительного активирования наносимой шихты и поверхности детали изменяется степень предварительной пластической деформации, что влияет на величину диффузионной зоны, площади взаимодействия и другие характеристики покрытий (см. рис. 4, б).

**Стойкость покрытий к фрикционному износу.** В большинстве случаев защитные покрытия используются для повышения износостойкости деталей машин и инструмента. Объектом исследования были образцы из стали 65 Г с покрытиями следующих составов: TiC/(Co - Cr - B - Si) 10 мас. % и TiC/(Ni - Cr - B - Si) 10 мас. %. Во всех случаях толщина покрытий составляла 0,2 мм.

Результаты сравнительных испытаний покрытий в паре с твердосплавным контртелом и самого контртела показаны на рис. 5. Максимальной износостойкостью в паре с более твердым контртелом обладает покрытие TiC/(Co - Cr - B - Si) 10 мас. %. Интенсивность изнашивания комплексного покрытия TiC/(Ni - Cr - B - Si) мас. 10 % несколько выше. Стоит заметить, что Ni и Co сходны по химическим и коррозионным свойствам. Равновесный электродный потенциал Co (-0,28 В) заметно выше, чем у Fe (-0,44 В), но близок к Ni (-0,25 В). В пользу кобальтовой связки говорит и тот факт, что при совместном воздействии коррозионных и истирающих нагрузок лучшие из кобальтовых сплавов многократно превосходят коррозионно-стойкие сплавы Ni и Fe.



**Рис. 5. Износ покрытий (а) и контртела (б) при покрытиях:**  
 1 - TiC/(Ni - Cr - B - Si) 10 мас. %; 2 - TiC/(Co - Cr - B - Si) 10 мас. %

### Выводы

1. Разработаны способы нанесения исходной шихты на детали с различными контурами поверхностей.
2. На основе проведенного анализа свойств тугоплавких соединений, учитывая требования, предъявляемые к покрытиям, стойким в условиях абразивного изнашивания, а также доступность материалов, уровень сложности технологических схем и экономические аспекты отобраны 2 состава смесей для нанесения покрытий на основе карбида титана:

- Ti - сажа/(Ni - Cr - B - Si) мас. 10 %;
- Ti - сажа/(Co - Cr - B - Si) 10 мас. %, при обработке электродами марки «калмоной» и «стеллит» соответственно.

3. Результаты сравнительных испытаний покрытий в паре с твердосплавным контртелом и самого контртела показали, что наибольшей износостойкостью обладает покрытие  $TiC/(Co - Cr - B-Si)$  масс. 10 %, это доказывает, что карбид титана на кобальтовой связке имеет существенно более высокую стойкость.

4. Установлено, что предварительное активирование шихты и поверхности основы позволяет уменьшить температуру иницирования реакции и увеличить переходную зону и толщину покрытия восстанавливаемой детали.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мрочек Ж.А., Кожуро Л.М., Филонов И.П. Прогрессивные технологии восстановления и упрочнения деталей машин. - Мн.: Технопринт, 2000. - 186 с.
2. Мошков А.Д. Пористые антифрикционные металлокерамические материалы. - М.: Машиностроение, 1968.-246 с.
3. Мамедов А.Т. Порошковые материалы конструкционного и антифрикционного назначения. - Баку: Элм, 1991.- 186 с.
4. Кайдас Ч. Трибохимия керамики // Безызнаемость. - 1996. - № 4- С. 58 -73.
5. Дроздов Ю.Н., Хуршудоев А.Г., Панин В.Я. Метод выбора керамических материалов для пары трения кулачок - толкатель //Трение и износ. - 1993. - 14, № 3. - С. 479 - 486.
6. Баранов Н.Г., Федорченко И.М. Некоторые особенности фрикционного взаимодействия в паре трения металл - керамика// Трение и износ. - 1989. - 10, № 2. - С. 283 - 288.
7. Влияние скорости скольжения на износ пары керамика - сталь при трении без смазки / А.М. Ковальченко, И.И. Осипова, Ю.Г. Гогоци и др. //Трение и износ. - 1992. - 13, № 6. - С. 654 -663.
8. Теория и практика нанесения защитных покрытий / П.А. Витязь, В.С. Ивашко, А.Ф. Ильюшенко и др. - Мн.: Беларуская навука, 1998. - 583 с.
9. Дорожкин Н.Н. Упрочнение и восстановление деталей машин металлическими порошками. - Мн.: Наука и техника, 1975. - 152 с.