

# ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ЭЛЕКТРОИСКРОВЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ КАРБИДА ТИТАНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА

В.В. Саранцев\*, Л.В. Маркова\*\*, Е.Л. Азаренко\*

\* Белорусский национальный технический университет,  
пр. Независимости, 65, г. Минск, 220013, Республика Беларусь, [BNTU\\_MTF@mail.ru](mailto:BNTU_MTF@mail.ru)  
\*\* ГНУ Институт порошковой металлургии НАН Беларусь,  
ул. Платонова, 41, г. Минск, 220005, Республика Беларусь

Исследованы композиционные покрытия, полученные методом электроискрового легирования и самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Установлено, что сформированные композиционные покрытия состоят из карбидов титана, равномерно распределенных в металлической матрице. Величина зерен карбида титана – 0,1–4,0 мкм. Крупные зерна карбида титана в покрытии состоят из дисперсных карбидов с размерами менее 1 мкм. Исследование структуры композиционных покрытий в дорожках трения после проведенных испытаний показало, что формируемые покрытия имеют высокую износостойкость.

УДК 621.793

Разработка и внедрение новых технологий формирования композиционных покрытий на рабочих поверхностях деталей машин и механизмов являются весьма актуальной задачей для промышленности любой страны.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Область использования покрытий, полученных при электроискровом легировании (ЭИЛ), очень широка – это режущие и вырубные инструменты, посадочные места подшипников, торцевые уплотнения, рабочие поверхности лопаток паровых турбин и т.д.

Сущность процесса ЭИЛ заключается в переносе материала электрода на поверхность обрабатываемой детали в процессе электрической эрозии и полярного переноса материала анода (инструмента) на катод (деталь) при протекании импульсных разрядов в газовой среде [1, 2].

Технология ЭИЛ обладает рядом положительных свойств, к которым относятся:

- надежность и сравнительная простота оборудования и технологического процесса;
- относительно небольшие габариты и вес оборудования и оснастки;
- мобильность оборудования и применимость его в условиях любого производства;
- возможность локального нанесения покрытия на детали;
- высокая прочность сцепления покрытия с подложкой (деталью);
- незначительность нагрева поверхности детали, как правило, не превышающая 300°C;
- возможность формирования покрытий из любых токопроводящих материалов на любые токопроводящие детали;
- экологичность процесса.

Однако технология ЭИЛ не лишена и определенных ограничений:

- низкая производительность процесса (0,5–2 см<sup>2</sup>/мин);
- небольшая толщина слоя покрытия при использовании тугоплавких электродов (15–100 мкм).

Технические решения, направленные на повышение производительности, увеличение толщины слоя и уменьшение энергозатрат, имеют весьма существенные достоинства, но, к сожалению, не лишены некоторых недостатков.

Наиболее ценные результаты, полученные исследователями при совершенствовании технологии ЭИЛ, позволили установить, что новая технология должна состоять из традиционного ЭИЛ с использованием порошков, находящихся в межэлектродном промежутке, способных к тепловыделению

и образованию тугоплавких соединений. Тепловыделение при синтезе порошков позволит решить вопросы энергосбережения и повысить производительность процесса [3].

Для решения таких задач наиболее целесообразным является использование СВС-реагентов в качестве порошковых смесей. Как известно из литературных источников, уникальный метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) привлекателен потому, что после однократного локального инициирования волна горения движется по реакционной шихте с высокой скоростью (до 15 см/с) при обильном выделении тепла, которое разогревает синтезируемое вещество в зоне реакции до высокой температуры [4]. С помощью СВС можно синтезировать огромное количество тугоплавких соединений с дополнительным тепловыделением.

Как показали результаты исследований, создание покрытий на основе карбида титана позволяет повысить износостойкость, твердость при высоких и низких температурах, химическую стабильность, окислительную стойкость. Также карбидтитановые покрытия имеют небольшой коэффициент трения, хорошее сцепление с поверхностью материала-основы, малую склонность к схватыванию и холодной сварке, способность не разрушаться под воздействием механических и тепловых нагрузок [5, 6]. При этом физико-механические свойства покрытий улучшаются при уменьшении размера зерен карбида титана. Таким образом, повышение производительности нанесения покрытий ЭИЛ и уменьшение размера карбида титановых зерен в составе композиционных покрытий (КП) являются важной задачей.

Сочетание двух известных процессов – ЭИЛ и СВС – позволяет формировать КП при значительно меньших энергозатратах по сравнению с традиционным способом ЭИЛ, что способствует повышению качества и росту толщины покрытия, а также улучшению его сплошности [7].

Для исследования процесса нанесения КП при СВС и ЭИЛ использовали смесь реагентов, состоящую из порошков Ti – C – Ni. Смесь титана с сажей приготовлена в соотношении, образующем при СВС стехиометрический  $TiC_x$  ( $x = 1$ ). Никель введен в состав порошка для образования металлической матрицы.

Начальный слой СВС-реагентов предварительно наносится на основу (рис. 1). После чего проводится ЭИЛ по слою порошковых СВС-реагентов. В результате за один проход можно получить КП с толщиной слоя до 0,3 мм. Материал подложки – сталь 45. Электродом служил электрод «Стеллит» состава: Co – 58%, Cr – 28%, W – 4,5%, C, Ni, Fe, Mn Si – остальное.

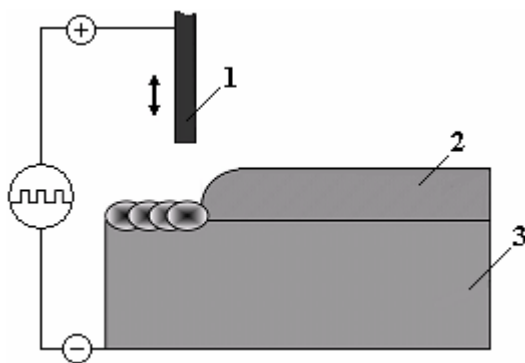


Рис. 1. Схема процесса нанесения КП при СВС и ЭИЛ:  
1 – электрод; 2 – слой СВС-реагентов; 3 – основа

Морфологию поверхности и микроструктурный анализ поперечного сечения покрытий осуществляли с помощью сканирующего электронного микроскопа высокого разрешения «Mira» фирмы «Tescan» (Чехия) с микрорентгеноспектральным анализатором «INCA Energy 350». Исследования проводили как по точкам (точечный микрорентгеноспектральный анализ) с концентрационными кривыми распределения, так и применяя съемку в характеристическом рентгеновском излучении. На экране цветного дисплея получали картину распределения исследуемого элемента. Концентрация элемента определялась плотностью цвета.

Для установления фазового состава покрытия применяли съемку в режиме BSE – изображение формируется с использованием отраженных от объекта электронов. В режиме BSE контраст создается с учетом усредненного атомного номера элементов.

Износостойкость покрытий определяли с помощью блока для исследования процессов трения. Нагрузка на индентор составляла 50 г, путь – 50 м. Индентор в виде шарика диаметром 3 мм совершал возвратно-поступательное движение по поверхности образца в отсутствие смазки.

## ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

### Микроструктурные исследования

В процессе формирования КП при ЭИЛ и СВЧ образуется расплав, состоящий из продуктов высокотемпературного горения, материала электрода и материала основы. В результате комбинации процессов ЭИЛ и СВЧ в межэлектродном промежутке реализуется повышенная температура, приводящая к перегреву расплава. Расплав находится в контакте с деталью, которая интенсивно отводит тепло вглубь и рассеивает его. В результате перегретый расплав металлов быстро охлаждается. Такая термообработка приводит к получению КП с ультрадисперсной структурой (размеры частиц TiC 0,1–8,0 мкм).

На микроструктуре (рис. 2,а), согласно микрорентгеноспектральному анализу (МРСА) (рис. 2,б), частицы карбида титана определены в виде темных включений на сером фоне. Область серого цвета, окружающая частицы карбида титана, согласно данным МРСА, содержит Co, Cr, W, Mn, Si, Ni и Fe, образующие по всей глубине КП металлическую матрицу в виде твердых растворов.

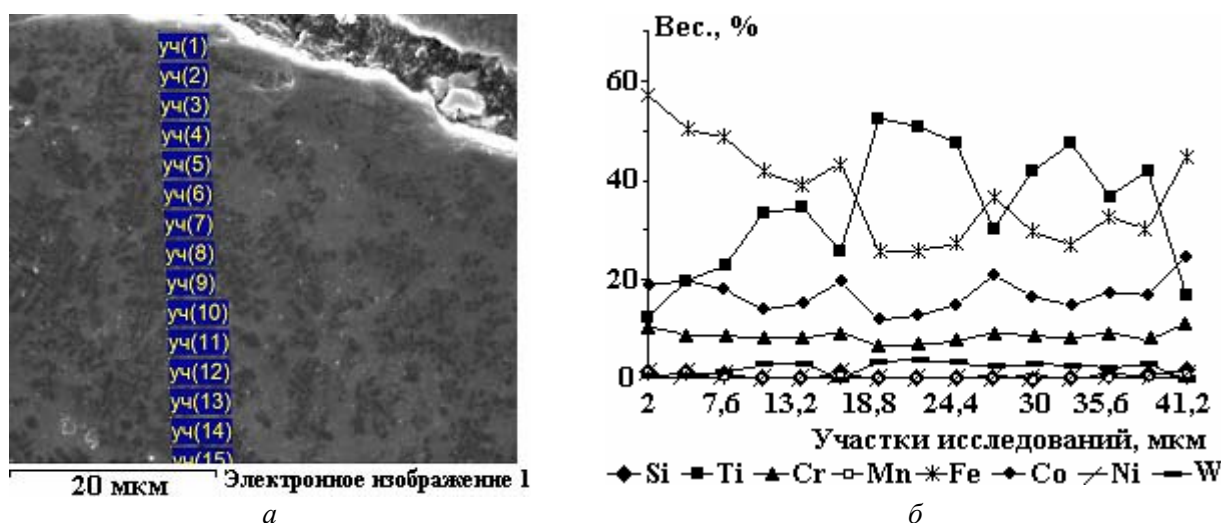


Рис. 2. Микроструктура и концентрационные кривые распределения в КП

Детальное изучение КП (рис. 3) выявило наличие нескольких участков. В верхней части (участок 1) присутствуют карбиды с дендритообразной структурой, вытянутой в направлении охлаждения, то есть к поверхности. Ниже (2) карбиды имеют округлую мелкозернистую форму (0,1–4,0 мкм). В средней части (участки 3, 4) наблюдается скопление крупных карбидов (~ 10 мкм) с небольшим количеством металлической матрицы вокруг них. В приграничной с основой зоне находятся карбиды округлой формы, равномерно распределенные по металлической матрице.

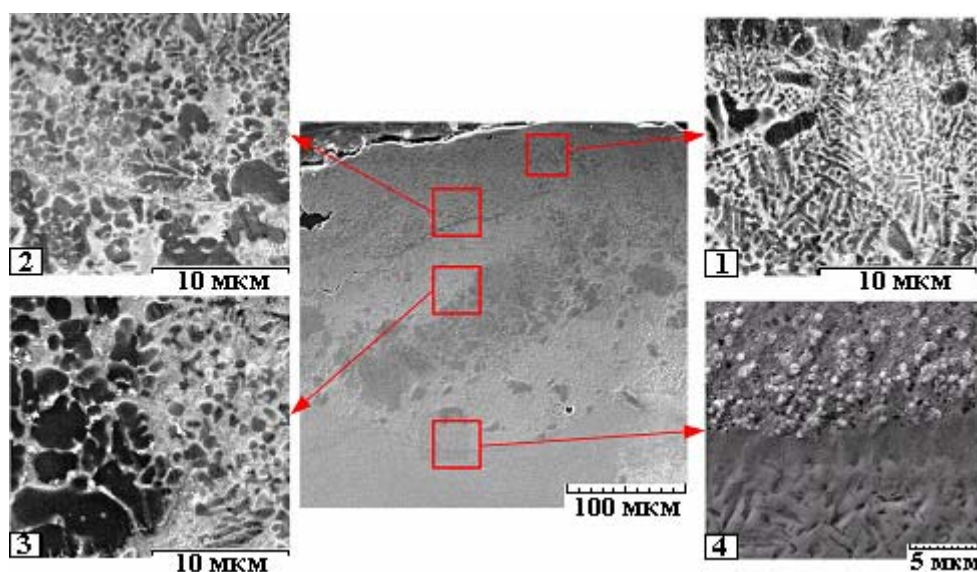


Рис. 3. Микроструктура КП, сформированного ЭИЛ и СВЧ

Рост зерен в центральной части КП связан с особенностью кристаллизации покрытия из расплава. Укрупнение зерна происходит из-за более медленной скорости охлаждения центральной части расплава по отношению к периферии. Мелкозернистая структура образуется в поверхностном слое за счет теплоотвода в окружающую среду, а также в приповерхностном слое детали за счет теплоотвода в глубь изделия. Однако в верхней зоне (1) структура представлена коллективизированными зернами карбида титана, вытянутыми к поверхности. Объединение зерен происходит при наличии небольшого количества жидкой фазы, не более 10% (см. рис. 3). В условиях наличия обильного расплава зерна TiC не коллективизируются и распределены равномерно по металлической матрице. Такая структура характерна для пограничной с основной зоны (4), где находится большое количество железа, попавшего при оплавлении подложки.

Полученные данные исследований структуры в характеристическом рентгеновском излучении поперечного сечения покрытия свидетельствуют о том, что границы зерен карбида титана не ярко выражены. При наложении распределения Fe и Ti четко видно, что по краям зерен присутствует железо (рис. 4). Границы карбидов размыты, и наблюдается частичная диффузия Fe в карбиды Ti. При рассмотрении картины распределения углерода видно, что края зерен карбида титана более светлые, а это означает, что концентрация углерода по краям несколько ниже.

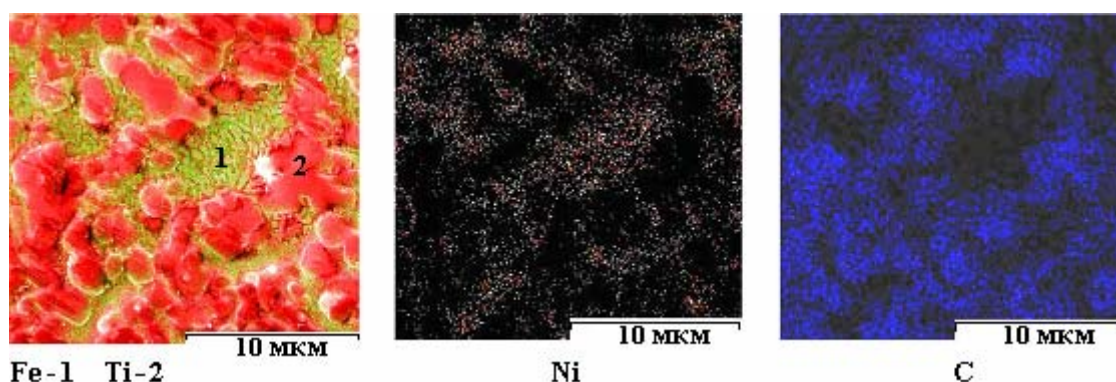


Рис. 4. Съемка в характеристическом рентгеновском излучении поперечного сечения покрытия

Металлическая матрица, в которой располагаются карбиды, напоминает перлитную структуру в сталях (см. рис. 3, участок 1). Исходя из полученных данных можно сделать вывод, что и C, и Ni, которые не участвуют в формировании карбидов, образуют твердый раствор с железом.

Между зернами карбида наблюдается мелкодисперсная структура твердого раствора Fe с Ni (см. рис. 4). Образование металлической матрицы в виде твердого раствора подтверждается также распределением Ni и Fe. В процессе исследований установлено, что распределение никеля полностью повторяет распределение железа, что свидетельствует о том, что данные элементы образуют твердый раствор. Диффузия никеля в карбиды титана отсутствует.

#### Трибологические испытания

После проведения ЭИЛ по слою СВС-реагентов покрытия имели выраженный рельеф поверхности, поэтому перед испытанием на износостойкость поверхность данных покрытий необходимо подвергать шлифовке.

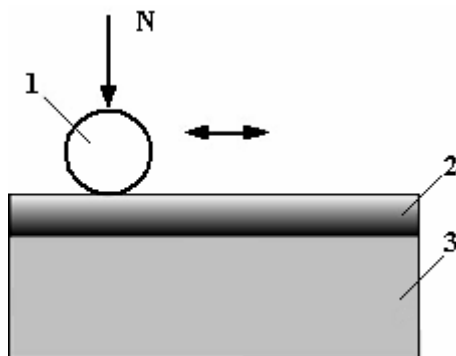


Рис. 5. Схема проведения трибологических испытаний.  
1 – индентор; 2 – КП; 3 – основа



Износостойкость покрытий определяли с применением блока для исследования процессов трения (микронотрибометр). В качестве индентора в машине трения используется шарик диаметром 3 мм. Нагрузка на индентор (контртело) составляла 50 г, путь – 50 м. В результате возвратно-поступательного движения по поверхности образца без смазки (рис. 5) реализуется схема контакта – «сфера-диск».

Длина единичного прохода по поверхности образца – 10 мм. В процессе испытаний на износостойкость определялся коэффициент трения. Исследовался процесс «сухого» трения без добавления смазочных материалов в зону трения. В процессе испытаний регистрировался коэффициент трения  $K_{тр}$ . На рис. 6 представлены зависимости коэффициента трения от длины пути прохода сферического индентора по поверхности образца с покрытием.

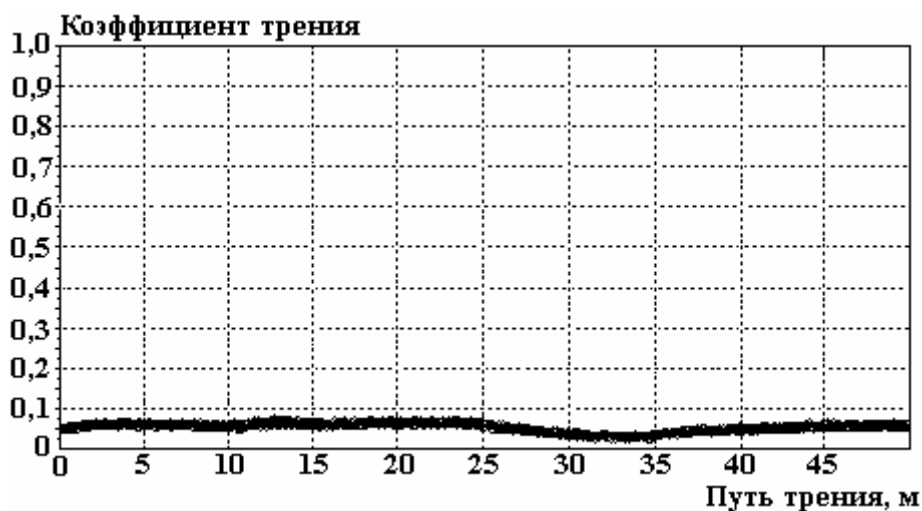


Рис. 6. График измерения коэффициента трения

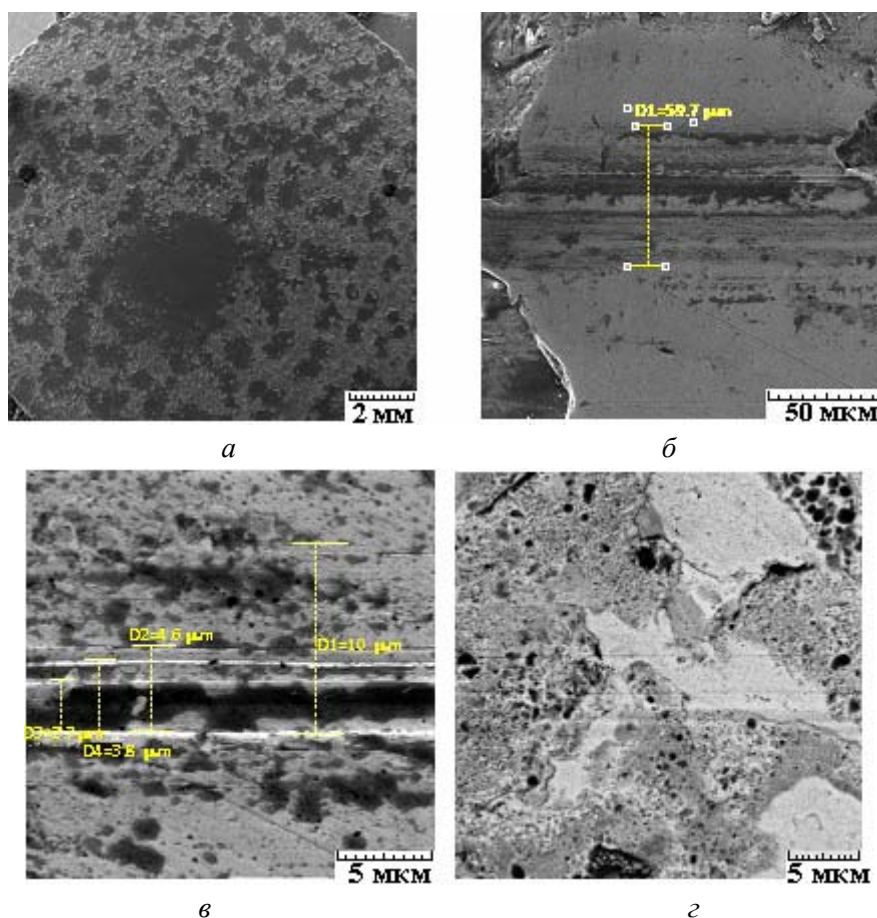


Рис. 7. Структура покрытия в дорожках трения. а)  $\times 14$ ; б)  $\times 1000$ ; в)  $\times 8000$ ; г)  $\times 6000$

На рис. 7 показана структура покрытия в дорожках трения после проведенных испытаний на износостойкость. Полученное покрытие имеет развитый рельеф поверхности (рис. 7,а). Увидеть дорожки трения можно только на выступах покрытия (рис. 7,б). В процессе испытания покрытие разрушилось не более чем на 5–10%. Общая ширина дорожки трения – примерно 60 мкм. При большом увеличении видно, что ширина дорожки трения при максимальной глубине износа составляет 8–12 мкм (рис. 7,в). Глубина износа невысокая, нет больших перепадов. Явного отслоения покрытия или его разрушения не наблюдается, что говорит о его высокой износостойкости. Покрытие до основы в процессе испытаний не разрушилось.

При съемке в режиме BSE хорошо видно, что на поверхности покрытия в районе дорожки трения выявлено присутствие более четырех фаз различного состава (см. рис. 7,з).

Съемка в характеристическом рентгеновском излучении поверхности покрытия в дорожке трения показана на рис. 8. Присутствие элементов, входящих в состав покрытия (Ti, Ni, Cr, C и др.), также подтверждает высокую износостойкость данного покрытия. В случае полного повреждения покрытия на снимках присутствовало бы только чистое железо. Наличие кислорода говорит о том, что отдельные участки поверхности в дорожке трения частично окисляются (рис. 8,б). Это свидетельствует о том, что в процессе испытаний идет разогрев поверхности в районе дорожки трения.

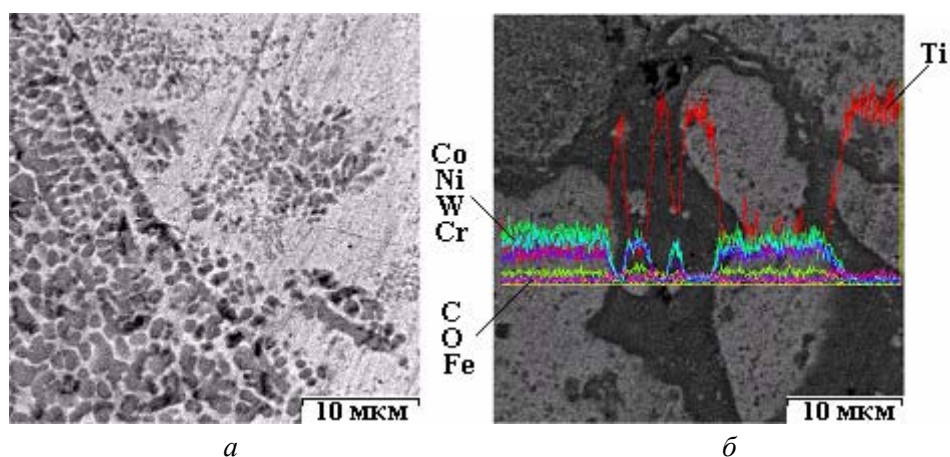


Рис. 8. Съемка в характеристическом рентгеновском излучении покрытия в дорожках трения

При наложении кривых распределения элементов в дорожках трения отчетливо видно, что концентрация железа не превышает концентрацию элементов, входящих в состав покрытия (см. рис. 8,б), причем есть участки, где содержание титана очень высоко. Содержание Cr, Ni и Fe в покрытии практически одинаковое. Титан в свою очередь образует карбиды, которые частично начинают окисляться в процессе испытаний на трение.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате использования комбинированной технологии ЭИЛ и СВС формируется сплошное плотное композиционное покрытие толщиной 150–250 мкм без микро- и макротрещин;

- в процессе нанесения покрытия происходят оплавление материала подложки (железа) и перемешивание его с электродным материалом, при этом диффузия никеля в основу практически полностью отсутствует, диффундирует в незначительном количестве титан, легируя материал подложки;

- покрытие представляет собой многокомпонентную легированную матрицу в виде твердого раствора с достаточно равномерным распределением дисперсных карбидов титана по всему объему;

- в верхней части покрытия и в переходной зоне располагаются дисперсные карбиды титана размером до 1 мкм, а в средней части покрытия они достигают 4 мкм;

- крупные карбиды вырастают при слиянии дисперсных в течение времени формирования покрытия;

- исследование структуры композиционных покрытий в дорожках трения после проведенных испытаний показало, что формируемые покрытия имеют высокую износостойкость и максимальная ширина дорожки трения не превышает 20 мкм.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Золотых Б.Н. 50 лет электроэрозионной обработки (EDM): Пройденный путь и перспективы дальнейшего прогресса. *Электронная обработка материалов*. 1994, (1), 4–7.

2. Ставицкий Б.И. Основные этапы, современное состояние и перспективы развития электроискровой обработки материалов. *Электронная обработка материалов*. 1994, (1), 7–11.
3. Саранцев В.В. Достижения и развитие технологии электроискрового легирования (обзор). *Инженерный вестник*. 2006, (2), 67–72.
4. Мержанов А.Г. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез: о прошлом, настоящем и будущем. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2006, (5), 5–9.
5. Саранцев В.В. Повышение эксплуатационной стойкости инструментального материала на основе карбида титана, полученного самораспространяющимся высокотемпературным синтезом и электроискровой обработкой. *Автореф. дис. канд. техн. наук*, Саранцев В.В. Новополоцк, 2008. 16 с.
6. Саранцев В.В. Технология получения композиционных покрытий электроискровой обработкой обмазок из СВС-реагентов. *Ремонт, восстановление, модернизация*. 2007, (2), 13–17.
7. Реут О.П., Хина Б.Б., Саранцев В.В., Маркова Л.В. Применение самораспространяющегося высокотемпературного синтеза и электроискровой обработки для нанесения композиционных покрытий. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2007, (12), 49–56.

*Поступила 15.06.11*

### **Summary**

The composite coatings obtained by the method of electrospark doping and the self-propagating high-temperature synthesis have been examined. It is revealed that the generated composite coatings consist of the titanium carbides which are uniformly distributed in the metal matrix. The grains of titanium carbide are of the size of 0,1–4,0 microns. Large titanium carbide grains in the coatings consist of disperse carbides of the size less than 1 micron. The investigation of the structure of the composite coatings in the friction tracks after the performed tests has shown that the formed coatings have high wearing capacity.

---