

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНЫХ ПОКРЫТИЙ  
СИСТЕМ TiC-TiAl И TiB<sub>2</sub>-Ti-Al МЕТОДОМ ПРОСВЕЧИВАЮЩЕЙ  
ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ**

**Романов Д.А., Громов В.Е., Степиков М.А., Гаевой Е.А., Григорьева Е.А.**  
*Сибирский государственный индустриальный университет,  
г. Новокузнецк, Россия, E-mail: romanov\_da@physics.sibsiu.ru*

**Введение**

Согласно проведенному обзору литературы за последние два десятилетия перспективно формировать износостойкие покрытия с низким коэффициентом трения систем TiC-TiAl и TiB<sub>2</sub>-Ti-Al. Например в [1], для повышения показателей износостойкости гамма-TiAl интерметаллического сплава, порошки сплава Ti-Al-TiC были получены на поверхности TiAl интерметаллического сплава, затем обработаны с помощью лазера CO<sub>2</sub> высокой мощности. Морфология армированного TiC однородно диспергируется в матрице TiAl. Также, замечено повышение микротвёрдости. Лазерная наплавка композиционных покрытий обеспечивает лучшую износостойкость, чем оригинальный интерметаллический сплав гамма-TiAl. Согласно [2] композиционное покрытие из карбида титана, алюминидов, оксида алюминия и железа можно синтезировать с помощью центробежно-вспомогательной самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Этот композитный материал получают из уплотнённых титана и углерода порошков в виде гранул, внедрённых в подложку, которая была подвержена воздействию высокой температуры, вызванной термитной реакцией Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Al. Процесс проходил в графитовой стальной трубе, установленной в центробежную машину акселератора, специально разработанной для этой функции. Функционально гранулированное покрытие было произведено под полем центробежного ускорения и продукты термитной реакции (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Al) проникли в глубь TiC, что создало крепкий алюминид титана интерметаллический слой.

**Основная часть**

Композиционные покрытия системы TiC-TiAl были нанесены на штамповую оснастку из штамповых сталей X12MФ и 5XНМ, методом электровзрывного напыления на электровзрывной установке ЭВУ 60/10 М (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк) с использованием алюминиевой фольги, а также порошков титана и карбида титана с размером частиц 0,1...1,0 мкм. Покрытия нанесены при тепловом воздействии, вызывающем нагрев поверхности подложки до температуры плавления. Импульсное переплавление поверхностного слоя выполнено высокоинтенсивными электронными пучками, обеспечивающими контролируемый нагрев до температуры выше температуры плавления и самозакалку из расплава со скоростями охлаждения до 10<sup>6</sup> К/с. Данные условия облучения позволили формировать поверхностные сплавы с нано- и субмикроструктурной структурой, обладающие высокими физико-механическими свойствами.

Выполненные электронно-микроскопические микродифракционные исследования тонких фольг показали, что структура покрытия TiC-TiAl, нанесенного на сталь 5XНМ и обработанного дополнительно интенсивным импульсным электронным пучком, на расстоянии ≈10 мкм от поверхности модифицирования, является многофазной и содержит карбид титана состава TiC, твердый раствор на основе α-железа (объемноцентрированная кубическая кристаллическая решетка) и твердый раствор на основе γ-Fe (аустенит, гранецентрированная кубическая кристаллическая решетка). Частицы карбида титана имеют глобулярную форму (рис. 1); средние размеры частиц карбида титана изменяются в пределах (100-130) нм (рис. 1). α-фаза и γ-фаза также имеют глобулярную форму; Размеры α-фазы и γ-фазы существенно больше, по отношению к частицам карбидной фазы, и изменяются в пределах (0,8 – 1,0) мкм (рис. 2).

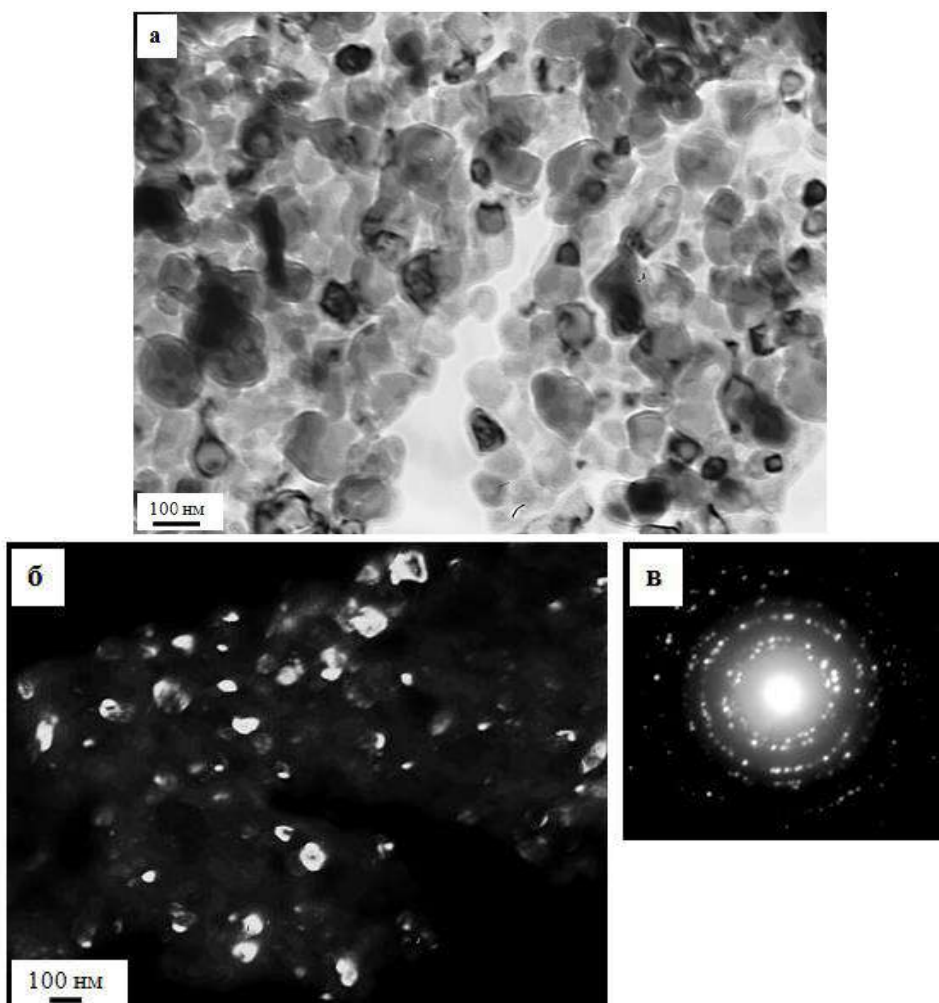


Рисунок 1 – Частицы карбида титана, расположенные в поверхностном слое покрытия TiC-TiAl, нанесенном на сталь 5ХНМ и обработанном интенсивным импульсным электронным пучком. Просвечивающая электронная микроскопия; а – светлое поле; б – темное поле, полученное в рефлексе [002] TiC; в – микроэлектроннограмма, стрелкой указан рефлекс, в котором получено темное поле (б)

Структура поверхностного слоя покрытия состава TiB<sub>2</sub>-Ti-Al, сформированного включениями пластинчатой формы, поперечные размеры которых изменяются в пределах (0,7-1,0) мкм; продольные размеры изменяются в пределах от 0,7 мкм до 3,5 мкм (рис. 1). Включения пластинчатой формы соседствуют с включениями округлой (глобулярной) формы, размеры которых изменяются в весьма широких пределах от 50 нм до 200 нм.

Зерна α-фазы (твёрдый раствор на основе железа с ОЦК кристаллической решеткой); размер зерен от 0,5 мкм до 1,5 мкм. По границам зерен α-фазы (рефлексы плоскости [135]α-Fe выделены цветом) располагаются включения Ti<sub>3</sub>.3Al; размеры частиц изменяются в пределах от 30 нм до 50 нм.

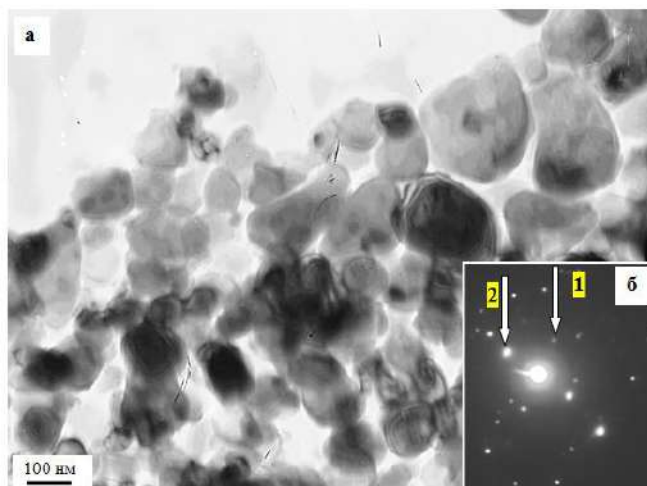


Рисунок 2 – Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхностного слоя (слоя, расположенного на глубине 10 мкм) покрытия TiC-TiAl, нанесенного на сталь 5ХНМ и обработанного интенсивным импульсным электронным пучком; а – светлое поле; б – микроэлектроннограмма. Индексирование микроэлектроннограммы позволило выявить рефлексы, принадлежащие карбиду титана TiC и твердому раствору на основе  $\alpha$ -Fe (1 - [002]TiC, 2 - [110]  $\alpha$ -Fe)

### **Заключение**

Таким образом, исследования, выполненные методами дифракционной электронной микроскопии, выявили формирование в поверхностном слое многофазной структуры, размеры фаз которой изменяются в пределах десяткой нанометров – единиц микрометров. Фазовый состав поверхностного слоя системы TiB<sub>2</sub>-Ti-Al, выявленный при индексировании микроэлектроннограмм, представлен следующими фазами:  $\alpha$ -фаза (твердый раствор на основе ОЦК кристаллической решетки железа), алюминиды титана (Al<sub>3</sub>Ti, Ti<sub>3</sub>Al), алюминиды бора AlB<sub>12</sub>, бориды железа Fe<sub>3</sub>B, ферриты титана Fe<sub>2</sub>Ti. Для покрытий системы TiC-TiAl структура является многофазной и содержит карбид титана, твердый раствор на основе  $\alpha$ -железа и твердый раствор на основе  $\gamma$ -Fe.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научно-го проекта № 16-32-60032 мол\_а\_дк, Гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук МК-1118.2017.2.

### **Список литературы:**

1. Microstructure and properties of laser cladding TiC/TiAl composite coatings on  $\gamma$ -TiAl in-termetallic alloy / J. Wang, R.G. Song, X. Lin, W.D. Huang// Surface Engineering. – 2009.– Vol. 25, № 6. -P. 196-200
2. In situ TiC-Fe-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiAl/Ti<sub>3</sub>Al composite coating processing using centrifugal assisted combustion synthesis / R. Mahmoodiana, M.A. Hassana, M. Hamdi et al. // Composites Part B: Engineering. – 2014. –Vol. 59. -P. 279–284
3. Электровзрывное напыление износ- и электроэрозионностойких покрытий / Д. А. Романов, Е. А. Будовских, В. Е. Громов, Ю. Ф. Иванов. – Новокузнецк: Изд-во ООО «Полиграфист», 2014. – 203 с.