

Международная научная конференция студентов и молодых учёных СТТ-2015. – с.

3. Солоненко О.П., Шурина Э.П., Головин А.А. Конечно-элементное моделирование соударения капли расплава с подложкой при плазменном напылении // Физическая мезомеханика, 2001. – с. 29-42.
4. Храпковская Ю.А., Зенин Б.С. Энергетическая активация атомов подложки при формировании газотермического покрытия // Новые материалы. Создание, структура, свойства: Сборник научных трудов XIV Всероссийской школы-семинара. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – с.139-142

## **ВЛИЯНИЕ НЕПРЕРЫВНОЙ И ИМПУЛЬСНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКИ НА ПОКРЫТИЕ ИЗ ХРОМОВАНИДИЕВОГО ЧУГУНА**

А.М.ТОЛСТОКУЛАКОВ<sup>1</sup>, Б.В.ДАМПILON<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Томский политехнический университет

<sup>2</sup> Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

E-mail: [ist.jimmy@mail.ru](mailto:ist.jimmy@mail.ru)

## **IMPACT CONTINUOUS AND IMPULSE ELECTRON BEAM PROCESSING TO SURFACE OF CHROMIUM-VANADIUM CAST IRON**

A.M.TOLSTOKULAKOV<sup>1</sup>, B.V.DAMPILON<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Tomsk Polytechnic University

<sup>2</sup> Institute of Strength Physics and Materials Science

E-mail: [ist.jimmy@mail.ru](mailto:ist.jimmy@mail.ru)

**Annotation.** The paper reports the results of an investigation of structure formation in the eutectic chromium-vanadium cast iron coating deposited by electron-beam hardfacing (EBH) and subjected to multipoint pulsed electron-beam treatment (MPEBT) of the surface layers. The coating material structure in the zones modified by MPEBT changes considerably, showing the presence of a large amount of supersaturated austenite matrix and eutectic colonies in the form of fine isolated inclusions. The eutectic colonies are fan-like. The leading phase in the eutectic colonies is vanadium carbide. After aging within the temperature range from 900 to 1100 °C the structure of the modified zones exhibits a large amount of fine secondary carbides Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> rejected from the matrix. The secondary carbides are uniformly distributed in the bulk of the modified zones. The matrix after aging undergoes  $\gamma \rightarrow \alpha$  transformation and mainly has the martensitic structure. Aging increases significantly the hardness of the modified zones and abrasive wear resistance of the entire coating.

**Введение.** Упрочнение различных деталей машин всегда востребовано в отрасли машиностроения. Концентрированные источники энергии, такие как лазерный и электронный луч, активно применяются для модифицирования поверхности, сварки, наплавки [1-3].

**Цель работы.** Проведение исследования и анализа структуры и свойств покрытия, состоящего из хромованидиевого чугуна, которое было получено с использованием метода электронно-лучевой наплавки и электронно-лучевой обработки в вакууме.

**Материалы и методики исследования.** Покрyтия были нанесены на подложку из малоуглеродистой стали на установке ЭЛУ-5. Импульсная электронно-лучевая обработка для модификации поверхности была проведена на предприятии ОАО «НПЦ Полyс». В настоящей работе, в качестве состава порошкового материала для электронно-лучевой наплавки был выбран белый хромистый чугун, разбавленный железом и легированный ванадием, для дисперсного упрочнения и получения эвтектического состава. Во многих случаях только сплавы из белых износостойких чугунов обеспечивают надежную эксплуатацию различной техники и деталей, работающих в условиях абразивного изнашивания[1]. Рентгенофазовый анализ был проведен на рентгеновском дифрактометре Shimadzu XRD 6000. Рентгеноспектральный микроанализ был выполнен на приборе Leo Evo 50. Нанотвердость измеряли с использованием измерительного комплекса Nanotest.

Таблица 1 - Химический состав наплавочного материала

Содержание, % мас.							
C	Cr	V	Si	Ni	Mn	W	Fe
2.5	18.9	5	1	1.1	0.72	0.2	Основа

**Результаты исследования.** Анализ металлографических исследований наплавленных покрытий показал, что основной объем характеризуется наличием эвтектических карбидов разветвленной формы. Расчетный состав наплавочного материала хорошо согласуется с данными оптико-эмиссионного анализа. Согласно данным РФА, покрытие состоит из аустенита, мартенсита, карбида  $M_7C_3$  и карбидов ванадия.

Таблица 2 - Данные РФА с поверхности наплавленного покрытия

Фаза	Фазовый состав покрытия, %
Аустенит	25
Мартенсит	30
$M_7C_3$	28
VC	12
$V_2C$	5

В дальнейшем, образцы с покрытием были отшлифованы и обработаны с определенной закономерностью импульсным сфокусированным в точку электронным лучом. В результате такой обработки на поверхности покрытия сформировались модифицированные зоны (зоны импульсного воздействия). Диаметр каждой зоны на поверхности составил порядка 1000 мкм, с глубиной 500-600 мкм. Между модифицированными зонами остались прослойки покрытия, не подвергавшиеся воздействию импульсного электронного луча и необходимые для релаксации напряжений.

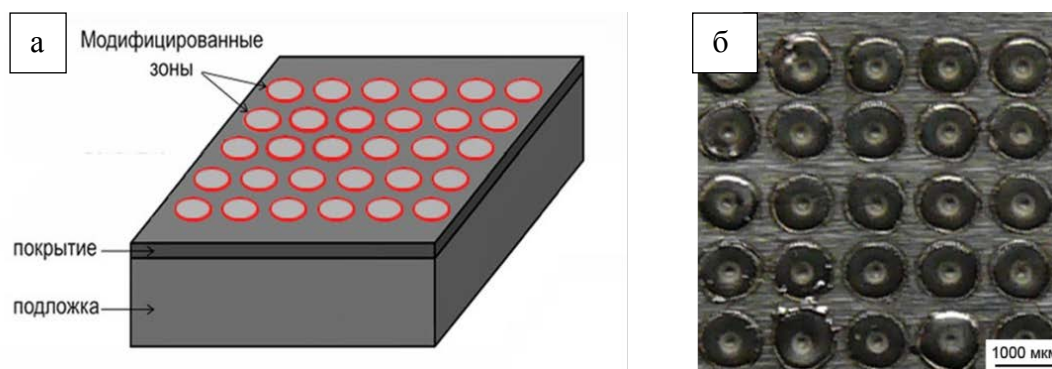


Рисунок 1 – а) схема обработки покрытия; б) фрагмент поверхности покрытия с модифицированными зонами

Каждая модифицированная зона образована в результате одного импульса электронного пучка с длительностью 15 миллисекунд. В отличие от исходного состояния, структура модифицированных зон характеризуется высокой степенью однородности благодаря равномерному распределению мелких (до 3 мкм) включений округлой формы, которые при большем увеличении представляют собой веерообразные эвтектические колонии. После импульсной обработки материал модифицированных зон уже состоит из преимущественно аустенита (60 об.%) и карбида ванадия VC (25%), являющегося ведущей фазой в эвтектических колониях.

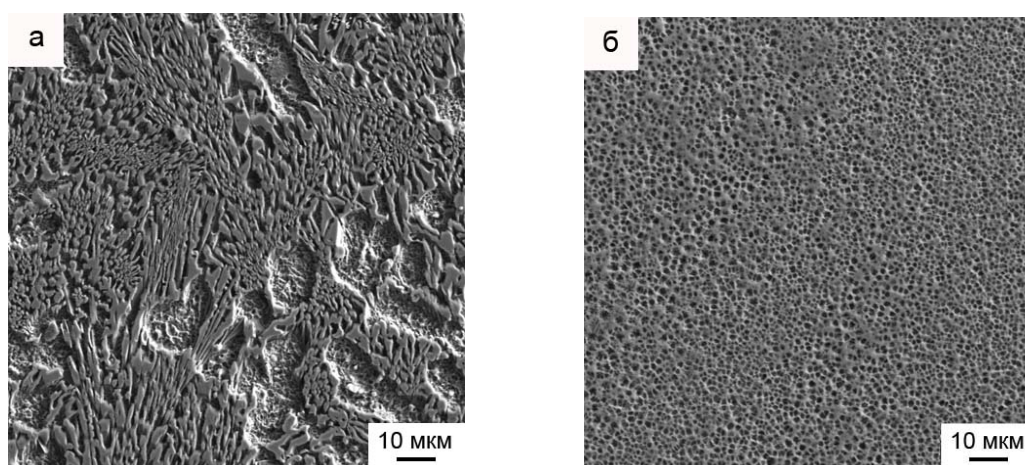


Рисунок 2 – а) микроструктура исходного покрытия и б) модифицированной зоны

В зоне воздействия электронного луча со временем импульса 15 мсек в материале покрытия видимо образуется жидкая фаза, которая мгновенно кристаллизуется по завершении воздействия луча. Карбиды ванадия первыми образуются из расплава и за время существования жидкой фазы образуют мелкие веерообразные колонии. Микрорентгеноспектральный анализ эвтектических колоний показал, что в их центре располагаются частицы, содержащие в среднем до 60% мас. V, 15% Cr, и 7% Fe.

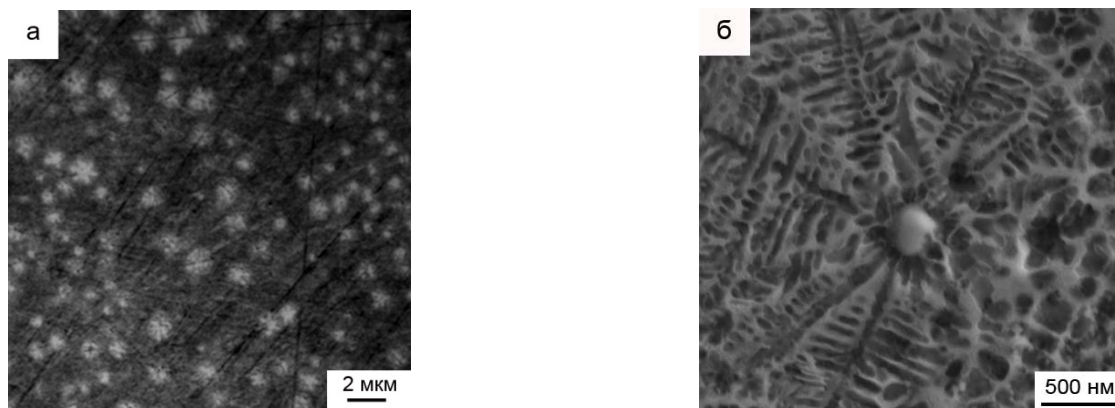


Рисунок 3- а) микроструктура модифицированной зоны и б) карбид ванадия - ведущая фаза эвтектических колоний

Таблица 3 - Данные МРСА центра эвтектических колоний

Химический элемент	Состав % мас.
V	60
Cr	15
Fe	7

Согласно данным МРСА, матрица модифицированной зоны, в среднем, содержит 17.68Cr, 3.64V, 0.56Si, 0.62Mn, 1.47Ni, 76.03Fe (% мас.), а матрица исходного покрытия – 11.12Cr, 1.47V, 0.66Si, 0.65Mn, 1.7Ni, 84.39Fe (% мас.) (табл.). Концентрация хрома и ванадия в аустенитной матрице повысилась в 1.6 и 2.5 раза, соответственно, по сравнению с матрицей исходного покрытия. В результате, фиксируется матрица, состоящая из значительного количества пересыщенного метастабильного аустенита, что обуславливает пониженную твердость модифицированной зоны (1.2 ГПа) по сравнению с покрытием исходного состояния (5.7 ГПа). С целью выделения вторичных карбидов из пересыщенной аустенитной матрицы модифицированных зон было проведено старение образцов при температуре 1100°C в течение 30 минут. Структура модифицированных зон после старения характеризуется наличием значительного количества вторичных мелкодисперсных (1-2 мкм) карбидов и высокой однородностью их распределения в объеме модифицированных зон. После старения общее содержание карбидов увеличилось с 30% до 52% об., мартенсита - с 10% до 39% об., а содержание аустенита снизилось с 60% до 9% об., по сравнению с материалом после импульсной обработки. Испытания покрытия на абразивную износостойкость и измерение твердости показали что максимальную износостойкость покрытия приобретают после старения при 1100°C, в результате повышения объемной доли карбидов (52 об.%) и мартенсита (39 об.%) в модифицированных зонах-  $K_{И} = 25 \pm 1$ , твердость  $H = 14,2 \pm 3,8$  ГПа

**Выводы.** Сформировано покрытие, состоящее из хромистого чугуна с добавлением порошков железа и ванадия. Состав покрытия - аустенитно-мартенситная матрица и карбиды  $M_7C_3$ ,  $V_2C$ ,  $VC$ . Обработка с использованием электронно-лучевой технологии приводит к формированию модифицированных зон, которые преимущественно состоят, из пересыщенного аустенита и мелких изолированных эвтектических колоний округлой формы, веерообразно расходящихся из центров колоний с ведущей фазой  $VC$ . Старение (термообработка) при температуре 1100 °C

с выдержкой 30 минут приводит к интенсивному выделению из пересыщенного аустенита мелкодисперсных вторичных карбидов  $M_7C_3$ , которые равномерно распределяются во объеме модифицированных зон. При этом происходит аустенитно-мартенситное превращение. Повышается абразивная износостойкость и твердость покрытий.

#### **Список литературы**

1. Цыпин И.И. Белые износостойкие чугуны. Структура и свойства.- М: «Металлургия» - 1983. С.110.
2. Гнусов С.Ф., Дураков В.Г. Электронный луч в формировании неравновесных структур: монография / Томский политехнический университет. -Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. 115 с.
3. Дампилон Б.В., Дураков В.Г., Зиганшин А.И. Патент РФ. RU 2494154 С1 «Способ обработки изделий из высокоуглеродистых легированных сплавов». Опубликовано: 27.09.2013 Бюл. № 27.
4. Сильман Г.И. Белые легированные чугуны с композиционной структурой // Металловедение и термическая обработка металлов. 200.- № 7. С. 94 – 100.

### **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ НА УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ**

*А.Е. ЕНЧИНОВА, Б.С. ЗЕНИН*

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
E-mail: milashka\_4b92@mail.ru

### **A COMPARATIVE ANALYSIS OF THE IMPACT OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF MATERIALS ON CONDITIONS OF FORMATION OF THERMAL COATINGS**

*A.E. ENCHINOVA, B.S. ZENIN*

Tomsk Polytechnic University  
E-mail: milashka\_4b92@mail.ru

**Abstract.** One of the main characteristics of the coating is adhesion. The magnitude of coating adhesion is determined primarily by the characteristics of the thermal cycle in contact. In this paper examines the impact of thermal characteristics of the material sprayed particles on the temperature conditions of formation of thermal spray coatings. The thermal conditions of the formation of coatings for model materials with a wide range thermo-physical characteristics was calculated.

**Введение.** Для многих отраслей машиностроения одним из наиболее прогрессивных технологических процессов, позволяющих повысить надежность, долговечность и качество выпускаемых машин, является газотермическое напыление (ГТН) покрытий [1]. Газотермическое напыление - наиболее перспективная и интенсивно разрабатываемая в настоящее время технология, обеспечивающая нанесение на рабочие поверхности деталей покрытий с заданными физико-механическими свойствами и дающая возможность использования для их изготовления взамен дорогостоящих менее дефицитные конструкционные материалы.

При формировании ГТН покрытий важная роль принадлежит тепловым условиям. Эти условия определяют структуру материала покрытия, структурное соотно-