

Содержание меди в фазе самофлюсующегося сплава в композиционном покрытии доходит до 10%, в то время как в порошке сплава ПГ-12Н-01 она отсутствует. Содержание никеля в этой фазе композиционного покрытия составляет 60-78%, хотя в порошке этого сплава содержание никеля составляет 80%, содержание хрома также меньше значений приведенных в таблице 1. В фазе самофлюсующегося сплава композиционного покрытия за счет диффузии из основы наблюдается большое содержание железа – 12-21%, против 1,2-3,2% в порошке сплава ПГ-12Н-01. Алюминий из фазы бронзы практически не проникает в фазу самофлюсующегося сплава.

В фазе бронзы композиционного покрытия содержание меди составляет всего 18-33%, тогда как в порошке бронзы меди 90%. В то же время содержание никеля в фазе бронзы доходит до 42-60%, содержание хрома – до 8%, а содержание железа – до 8-15%, хотя в порошке бронзы эти элементы отсутствуют. Содержание алюминия в фазе бронзы соответствует данным таблицы 1.

Сравнивая распределение элементов при разных скоростях лазерной наплавки, можно заметить некоторое влияние скорости наплавки на содержание элементов как в бронзовой составляющей (рис. 2), так и в фазе самофлюсующегося сплава композиционного покрытия (рис. 3).

Из рис. 2 видно, что при увеличении скорости наплавки сплава/бронзы со 100/150 мм/мин до 120/180 мм/мин в бронзовой составляющей композиционного покрытия количество никеля уменьшается, но в то же время возрастает количество меди и железа. При дальнейшем увеличении скорости наплавки до 140/210 мм/мин количество никеля в бронзовой составляющей вновь увеличивается, а количество меди и железа – уменьшается. Содержание хрома и алюминия в бронзовой составляющей практически не зависит от скорости наплавки.

На рис. 3 можно заметить, что при увеличении скорости наплавки сплава/бронзы со 100/150 мм/мин до 120/180 мм/мин в фазе самофлюсующегося сплава композиционного покрытия количество никеля уменьшается, а количество меди и железа увеличивается как и в фазе бронзы. С увеличением скорости наплавки до 140/210 мм/мин содержание никеля в фазе самофлюсующегося сплава композиционного покрытия возрастает, содержание же железа и меди уменьшается аналогичным образом. Содержание хрома и алюминия в фазе самофлюсующегося сплава композиционного покрытия как и в предыдущем случае от скорости наплавки не зависит.

Такой характер зависимостей связан скорее всего со сложными процессами нагрева – охлаждения происходящими с изменением скорости наплавки при нанесении многослойных композиционных покрытий, в том числе при повторных нагревах-охлаждениях при наплавке соседних валиков и слоев. Действующими факторами в данном случае могут являться величина энерговыклада в покрытие, величина экранирования излучения лазера аэрозолями наплавляемых металлов, а также соотношение теплоемкостей компонентов многослойного композиционного покрытия.

Литература.

1. О.Г. Девойно, М.А. Кардаполова, Н.И. Луцко, О.Н. Кавальчук. – Формирование однослойных композиционных полосчатых покрытий из сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01, получаемых лазерной наплавкой. – Современные методы и технологии создания и обработки материалов: Сб. научных трудов. В 3 кн. Кн. 2. Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки/ редколлегия: С.А. Астапчик (гл. ред.) [и др.]. – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2013. – 616 с.: ил., С. 177-184.
2. О.Г. Девойно, М.А. Кардаполова, Н.И. Луцко, А.С. Лапковский, О.Н. Кавальчук. – Формирование двухслойных композиционных покрытий из сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01, полученных лазерной наплавкой. – Инновационные технологии в машиностроении: материалы междунар. науч.-техн. конф., посвящ. памяти проф. В.Л. Кирпичева и 45-летию ПГУ, Новополоцк, 29-30 окт. 2013 г./ Полоц. гос. ун-т: под общ. ред. А.И. Гордиенко, В.К. Шелега. – Новополоцк, 2013. – 248 с., С. 126-130.

## СОЗДАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОГО ПОКРЫТИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕПРЕРЫВНОГО И ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ЛУЧА

*Б.В. Дампилов, к.т.н., доц., А.М. Толстокулаков, студент,  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
г. Томск, пр. Ленина, 30, тел. (3822)-12-34-56  
E-mail: Ist.Jimmy@mail.ru*

**Аннотация.** В настоящей работе представлены результаты исследования влияния импульсной электронной обработки и последующего отжига на структуру и твердость покрытий из хромо-ванадиевого чугуна. Покрытия были получены методом электронно-лучевой наплавки на подложке из малоуглеродистой стали. После шлифования поверхности покрытий были обработаны локально

импульсным сфокусированным в точку электронным пучком. Результаты исследования показали, что модифицированные зоны состоят из двух фаз. Первая фаза – пересыщенный аустенит. Вторая локально распределенные в объеме модифицированной зоны зародыши эвтектики. Результаты измерений системой NanoTest показали, что модифицированные зоны имеют низкие значения твердости. Низкие значения твердости, вероятно, обусловлено наличием значительного объема пересыщенного аустенита в модифицированной зоне. Отжиг приводит к значительному увеличению твердости модифицированных зон. В результате отжига (500°C) пересыщенный аустенит распадается. Повышение температуры отжига до 1100°C приводит к росту и коагуляции карбидной фазы модифицированных зон.

**Ключевые слова:** импульсивный, электронно-лучевая обработка, упрочнение покрытий из хромо-ванадиевого чугуна, модифицированные зоны, пересыщенный аустенит, отжиг, твердость.

**Введение.** Обработка поверхности различных металлов и сплавов концентрированными потоками энергий все шире применяется в инженерии поверхности. Целью такой обработки является модифицирование структуры и улучшение эксплуатационных свойств рабочего поверхностного слоя деталей машин и конструкций. Ресурс работы тяжелонагруженных деталей в основном определяется износостойкостью их рабочей поверхности. Поэтому использование дорогостоящих конструктивных материалов для изготовления всего объема деталей нецелесообразно. Экономически себя оправдывают детали со специальными покрытиями или модифицированными поверхностными слоями, обеспечивающими нужный комплекс свойств. Рабочая поверхность детали защищается от износа покрытием или модифицированным слоем, а прочность и вязкость детали в целом обеспечивается стальной основой.

Модифицированию поверхностных слоев материалов с помощью импульсных электронных пучков посвящено достаточно много работ [1-4]. Во всех работах авторами предпринята попытка модифицирования поверхности материалов широкоапертурным пучком с целью повышения эксплуатационных свойств значительной по площади поверхности изделия. В результате такой обработки формируется модифицированный слой глубиной несколько десятков микрон. Основными недостатками такой обработки являются: незначительная глубина модифицированного слоя и сплошная граница раздела, создающая сильнонапряженное состояние между модифицированным слоем и основным материалом, значительно отличающимися по структуре и свойствам (рис. 1а). Мягкие материалы при такой обработке еще способны обеспечить релаксацию напряжений на границе раздела, а высокопрочные легированные сплавы с элементами внедрения за счет значительной разницы в свойствах модифицированного слоя и основного материала уже не способны выдерживать напряжения на границе раздела, и релаксация напряжений происходит с образованием трещин в модифицируемом слое. Для эффективной релаксации напряжений необходимо создавать прерывистую границу раздела в процессе модифицирования поверхностных слоев. Для достижения указанного эффекта можно использовать локальную обработку поверхности материала сфокусированным в точку электронным пучком или развернутого в линию. В результате такой обработки можно сформировать локальные модифицированные зоны на глубину несколько сотен микрон и разграниченные прослойками исходного материала.

Одной из перспективных для нанесения покрытий и модифицирования поверхностного слоя является вакуумная электронно-лучевая технология. Технология позволяет наносить на детали тонкие покрытия в режиме напыления, покрытия значительной толщины в режиме наплавки порошковых материалов, а также производить обработку поверхности непрерывными и импульсными пучками электронов. Использование комплекса режимов электронно-лучевой технологии позволит конструировать рабочую поверхность тяжелонагруженных деталей машин и механизмов.

**Цель работы.** Исследовать структуры и некоторые свойства модифицированных зон, полученных локальной импульсной электронно-лучевой обработкой на поверхности покрытий из хромо-ванадиевого чугуна.

**Материал и результаты исследований.** Покрытия из эвтектического хромованадиевого чугуна были нанесены на подложки из малоуглеродистой стали методом электронно-лучевой наплавки (ЭЛН) в вакууме. Толщина наплавленных покрытий 2 мм. После шлифовки поверхность покрытий была локально обработана импульсным сфокусированным в точку ( $\varnothing 1$  мм) электронным лучом с дискретным точечным распределением в квадратной упаковке по площади поверхности покрытия (рис.1б). Каждая модифицированная зона образована в результате одного импульса электронного пучка с длительностью 15 миллисекунд. Микроструктуру модифицированных зон исследовали с помощью растрового электронного микроскопа Leo Evo 50 с использованием микрорентгеноспек-

трального анализа. Твердость модифицированных зон измеряли с помощью измерительного комплекса Nanotest. Термическую обработку образцов проводили в вакуумной печи при различных температурах от 500 до 1100°C с выдержкой 30 минут.

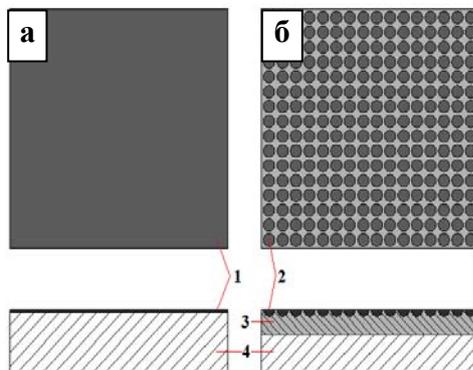


Рис. 1. Схематическое изображение образцов со сплошным модифицированным слоем (а) и с дискретным точечным распределением модифицированных зон в квадратной упаковке (б): 1 – модифицированный слой; 2 – модифицированная зона; 3 – наплавленное покрытие; 4 – материал упрочняемого изделия.

В результате локальной импульсной обработки электронным лучом на поверхности покрытия из хромованадиевого чугуна сформировались модифицированные зоны (зоны импульсного воздействия). Диаметр каждой зоны на поверхности составил порядка 500-600 мкм (рис. 2), с глубиной 400-500 мкм. Между модифицированными зонами остались прослойки покрытия, не подвергавшиеся воздействию электронного луча и необходимые для релаксации напряжений на границе раздела основного материала с модифицированными зонами. Модифицированные зоны образовались через жидкую фазу. При воздействии импульсного (15 мсек.) сфокусированного в точку пучка электронов на поверхность покрытия, материал в зоне воздействия быстро нагревается до температуры плавления и мгновенно кристаллизуется за счет интенсивного отвода тепла в объем материала. В результате такого воздействия материал в зоне воздействия находится в сильнонеравновесном структурном состоянии. Процесс можно характеризовать как закалку из жидкого состояния.

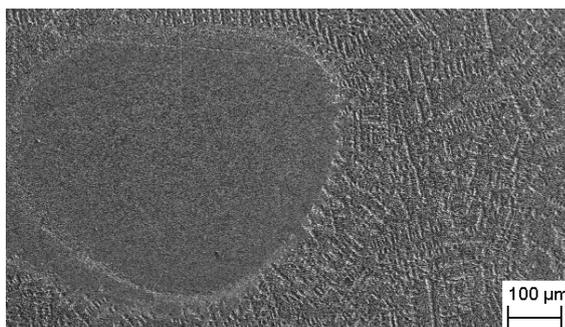


Рис. 2. Локальная модифицированная зона на поверхности покрытия из хромованадиевого чугуна, полученная импульсным воздействием электронного пучка (РЭМ)

Результаты исследований с использованием растровой электронной микроскопии показали значительное изменение структуры модифицированных зон по сравнению со структурой исходного покрытия (рис. 3). Модифицированные зоны состоят из двух фаз. Первая фаза представляет собой сильнопересыщенный аустенит, а вторая – ультрадисперсные зародыши эвтектики, имеющие характерную для эвтектики разветвленную форму. Аустенитная фаза имеет однородную структуру, занимает основной объем модифицированной зоны и фактически не травится «царской водкой». После травления сильнопересыщенный аустенит имеет вид сплошного каркаса с вытравленными участками зародышей эвтектики (рис. 3, б).

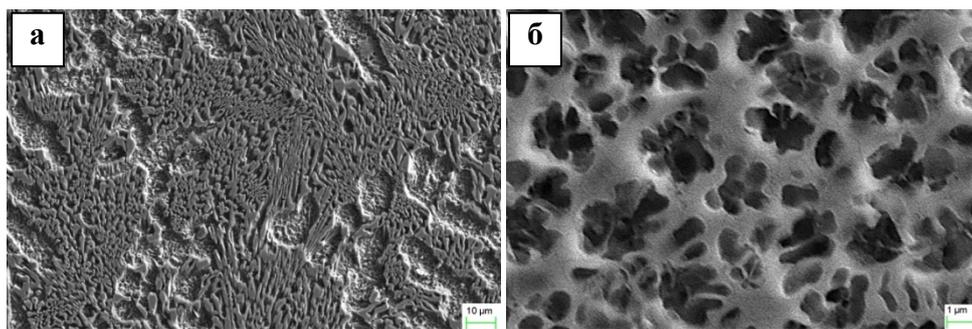


Рис. 3. Микроструктура исходного покрытия из эвтектического хромованадиевого чугуна (а) и микроструктура модифицированной зоны (б) после травления в «царской водке» (РЭМ)

В результате обработки покрытий из эвтектического хромованадиевого чугуна импульсным электронным лучом формируются модифицированные зоны с сильнонеравновесным структурно-фазовым состоянием. С целью приведения материала модифицированной зоны в более равновесное структурное состояние был проведен отжиг образцов при различных температурах. Результаты исследования показали, что после отжига при  $T=500^{\circ}\text{C}$  (рис. 4а) наблюдается распад сильнопересыщенного аустенита на эвтектоид с наноразмерными структурными аморфной фазы. Структура распавшейся аморфной фазы имеет вид эвтектики с наноразмерными структурными составляющими. Отжиг при более высоких температурах ( $700-800^{\circ}\text{C}$ ) приводит также к распаду аморфной фазы, заметному росту и коагуляции карбидной фазы эвтектики (рис. 4б, в). После отжига при  $1100^{\circ}\text{C}$  карбидная фаза уже представлена в виде отдельных частиц имеющих дисперсность 1-2 мкм (рис. 4г). Вторичные карбиды в зависимости от режимов термообработки имеют дисперсность от десятков нанометров до единиц микрометров, равномерно распределяясь в объеме модифицированных зон. Импульсная локальная обработка сфокусированным электронным лучом покрытий из эвтектического хромованадиевого чугуна, полученных электронно-лучевой наплавкой и последующий высокотемпературный отжиг приводят к значительному изменению структуры материала в модифицированных зонах относительно материала покрытия (рис. 5). Формируя сверхнеравновесное структурное состояние материала, можно в дальнейшем управлять его структурой последующей термической обработкой.

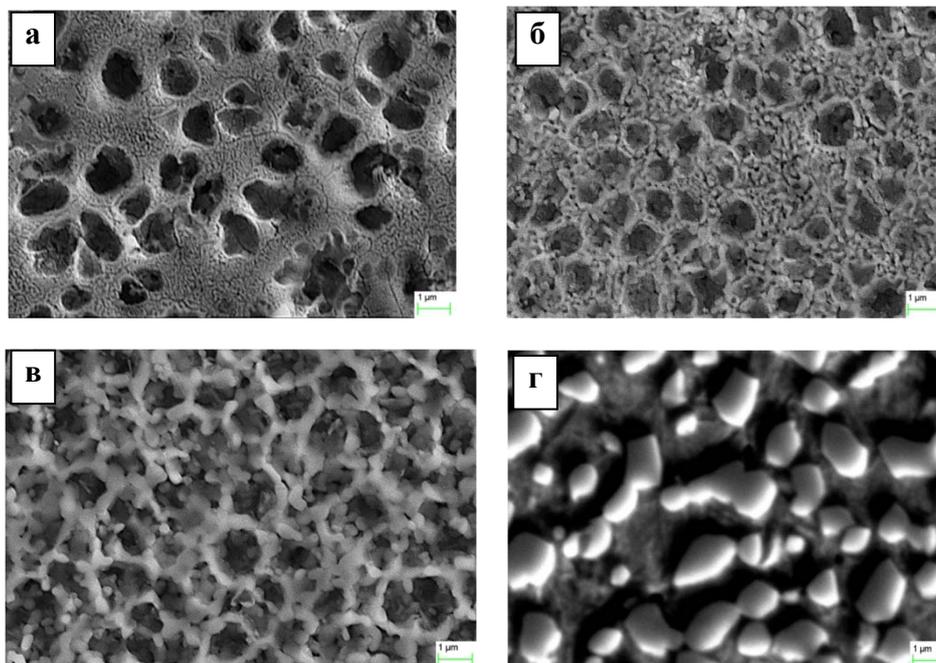


Рис. 4. Микроструктура модифицированных зон после отжига при различных температурах (травление в «Царской водке»): а – без ТО (исходная структура); б -  $500^{\circ}\text{C}$ ; в -  $700^{\circ}\text{C}$ ; г –  $800^{\circ}\text{C}$ ; д –  $1100^{\circ}\text{C}$

Проведенные измерения с помощью измерительного комплекса NanoTest показали, что материал модифицированных зон имеет очень низкие показатели твердости и модуля упругости (рис. 5). Низкие значения указанных свойств, вероятно, связаны с аморфным метастабильным состоянием основной фазы. Последующий высокотемпературный отжиг образцов приводит к значительному увеличению твердости и модуля упругости модифицированных зон. Вероятно, с увеличением температуры отжига за счет диффузионных процессов происходит достраивание карбидов до равновесного стехиометрического состава с увеличением их твердости и модуля упругости.

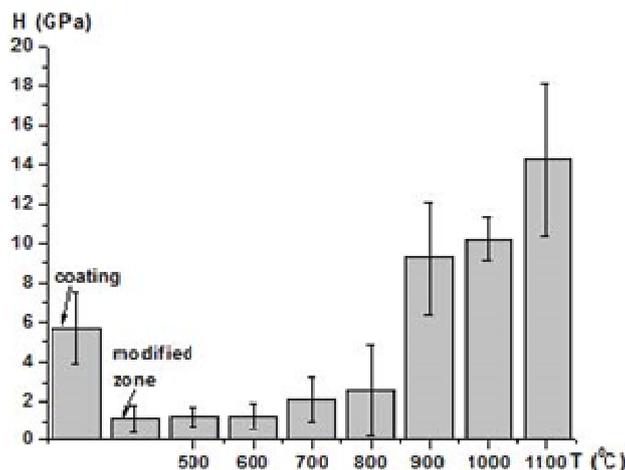


Рис. 5. Твердость модифицированных зон после наплавки, импульсной электронно-лучевой обработки и отжига при различных температурах (coating – исходное покрытие; modified zone – модифицированная зона)

**Заключение.** Локальная импульсная электронно-лучевая обработка покрытий из эвтектического хромованадиевого чугуна приводит к образованию модифицированных зон с сильнонеравновесным структурным состоянием. Материал модифицированной зоны состоит из сильнопересыщенного аустенита и зародышей эвтектики.

Модифицированные зоны имеют низкие показатели твердости из-за значительного количества сильнопересыщенного аустенита. Последующий отжиг образцов при 500°C приводит к распаду сильнопересыщенного аустенита на эвтектоид с наноразмерными структурными составляющими. Увеличение температуры отжига до 1100°C приводит к значительному росту и коагуляции карбидной фазы. Отжиг образцов в диапазоне 900-1100°C приводит к значительному увеличению твердости модифицированных зон. Повышение твердости вероятно связано с достраиванием карбидов до равновесного стехиометрического состава в указанном диапазоне температур.

Использование комплексной технологии включающей в себя электронно-лучевую наплавку, импульсную электронно-лучевую обработку и термическую обработку позволит конструировать поверхностные слои с высокими эксплуатационными свойствами на рабочей поверхности тяжелонагруженных деталей.

Литература.

1. Овчаренко В.Е., Псахье С.Г., Лапшин О.В., Колобова Е.Г. Модификация металлокерамического сплава электронно-импульсной обработкой его поверхности // Изв-я Томского политехнического университета. Технические науки. 2004. Том 37. №6. С. 75-80.
2. Полетика И.М., Гнусов С.Ф., Голковский М.Г. и др. Создание упрочняющих покрытий электронно-лучевой наплавкой и последующей импульсной обработкой электронным пучком // Упрочняющие технологии и покрытия. 2011. №1. С. 15-22.
3. Гнусов С.Ф., Тарасов С.Ю., Иванов Ю.Ф., Ротштейн В.П. Влияние импульсного электронно-лучевого плавления на микроструктуру и триботехнические свойства твердого сплава WC-сталь 110Г13 // Proc. of 6th Intern. Conf. on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. 23–28 Sept. 2002, Tomsk, Russia.
4. Proskurovsky D., Rotshtein V., Ozur G., et al. Pulsed electron-beam technology for surface modification of metallic materials // J. Vac. Sci. Technol. A 1694, 1998.