

# Особенности структурообразования покрытий из эвтектического хромованадиевого чугуна, полученных электронно-лучевой наплавкой

Б. В. Дампилон, В. Г. Дураков

---

Исследованы покрытия из эвтектического хромистого чугуна легированного ванадием. Основной объем покрытий имеет квазиэвтектическую структуру с аустенитной матрицей и карбидами  $(Cr,Fe,V)_7C_3$  и  $V_2C$ . В результате многослойной электронно-лучевой наплавки от границы раздела с подложкой формируется переходный слой из доэвтектического чугуна.

**Ключевые слова:** электронно-лучевая наплавка, белый хромистый чугун, ванадий, эвтектические карбиды, микротвердость, переходная зона.

---

The investigation results of eutectic chrome-vanadium cast iron coatings are presented in the given paper. The major coating volume has quasi-eutectic structure with austenitic matrix and carbides  $(Cr,Fe,V)_7C_3$  and  $V_2C$ . Transition zone at the interface is formed due to multilayer electron-beam surfacing. Transition zone has structure of hypoeutectic cast iron.

**Key words:** electron-beam surfacing, white cast chromium iron, vanadium, eutectic carbides, microhardness, transition zone.

---

## Введение

Проблема срока службы деталей машин и агрегатов, их долговечности и надежности имеет весьма большое значение в народном хозяйстве. Поэтому важной научной задачей является разработка упрочняющих и защитных покрытий, обладающих качественно новыми свойствами, функциональными и эксплуатационными характеристиками, обеспечивающими увеличение срока службы быстро изнашиваемых деталей машин. Высокохромистый износостойкий чугун является естественным композиционным материалом [1], к тому же достаточно недорогим и доступным для использования в качестве упрочняющего, износостойкого покрытия. Высокую износостойкость ему обеспечивает большая объёмная доля карбидной фазы. Но в тоже время такие чугуны плохо противостоят ударным нагрузкам из-за грубых первичных карбидов. Чем крупнее карбиды и большее их количество, тем больше очагов разрушения образуется на поверхности, и износ увеличивается. В условиях абразивного и ударного-абразивного

изнашивания с уменьшением размеров карбидов повышается износостойкость [1]. Следует отметить и немаловажную роль матрицы, так в работе [1] показано, что максимальная износостойкость обеспечивается при мартенситно-аустенитной и метастабильной аустенитной структуре матрицы. Известно, что строение карбидной фазы определяется процессом кристаллизации и, поэтому, используя чугуны эвтектических составов в сочетании с высокой скоростью охлаждения, можно добиться увеличения дисперсности карбидной подсистемы высокохромистых чугунов. Эвтектические хромистые чугуны, обладая разветвленной карбидной подсистемой, способны лучше противостоять ударным нагрузкам [1, 2].

Электронно-лучевая обработка может обеспечить скорость охлаждения сварочной ванны  $10^3 - 10^6$  °C/c за счет охлаждения в массу обрабатываемого металла [3]. Скорость охлаждения зависит как от массы обрабатываемого металла, так и от технологических параметров электронно-лучевой обработки.

Из предыдущей работы авторов [4] известно, что легирование заэвтектического хромистого чугуна

ванадием в количестве 4 масс. % повышает абразивную износостойкость покрытий, но не избавляет от грубых первичных карбидов.

Покрyтия из эвтектических чугунов обладают меньшей износостойкостью, поэтому для увеличения их абразивной износостойкости в них дополнительно вводят карбид титана. Суммарная доля твердых частиц в таких карбидочугунах может составлять более 70%. Частицы карбида титана размером от 3 до 5 мкм заполняют промежутки между эвтектическими карбидами. Они в процессе электронно-лучевой наплавки не растворяются в матрице и сохраняются в исходном виде, не меняя своих размеров [5, 6].

Измельчение упрочняющей фазы до наноструктурного состояния может увеличивать вязкость материалов, и они показывают лучшие износостойкие свойства [7, 8]. Мелкодисперсную упрочняющую фазу в высокохромистом чугуне можно сформировать, вводя в него в процессе наплавки сильные карбидообразующие элементы, например ванадий, и обеспечивая высокую скорость охлаждения расплава [4].

Меньшее значение химического потенциала углерода в карбиде ванадия по сравнению с карбидами хрома [9, 10] обеспечивает преимущественное выделение карбида ванадия и образования большего числа центров кристаллизации, что дополнительно будет сдерживать рост первичных карбидов хрома.

Используемый в работе метод нанесения покрытий — вакуумная электронно-лучевая наплавка представляет собой микрометаллургический процесс, в котором в качестве источника нагрева используется энергия электронного луча. Следует ожидать, что ванадий в процессе нанесения покрытий будет не только выделяться в виде самостоятельных карбидов, но и входить в состав как комплексных карбидов хрома, так и аустенитной матрицы.

Цель настоящей работы — исследование влияния ванадия на структурообразование покрытий из эвтектического хромистого чугуна в условиях электронно-лучевой наплавки.

### Материалы и методики эксперимента

Для нанесения покрытий использовали специально разработанную установку электронно-лучевой наплавки, созданную на базе электронно-лучевой сварочной установки ЭЛУ-5, с дополнительно оборудованной системой подачи порошкового наплавочного материала и блоком сканирования луча, обеспечивающим развертку в одну или две линии [11]. В качестве источника электронов приме-

нена электронная пушка с плазменным эмиттером на основе отражательного разряда с полым катодом [12]. Применение данного источника электронов обусловлено его высоким ресурсом работы в условиях технического вакуума, запыления катода парами наплавляемых металлов и частых разгерметизаций камеры.

Процесс наплавки происходит путём подачи наплавочного материала в зону действия электронного луча, развернутого в линию поперек движения наплавляемой детали. За один проход обычно наплавляется покрытие толщиной от 0,5 до 1 мм. Покрyтия толщиной 2 – 3 мм были наплавлены за несколько проходов на подложках из малоуглеродистой стали размером 250 × 25 × 15 мм<sup>3</sup>. Для предотвращения поворота и коробления подложки закреплялись на массивной стальной основе. Параметры наплавки: ускоряющее напряжение 27 кВ, ток луча до 60 мА, длина развертки электронного луча 20 мм, скорость наплавки 3 мм/с. В конце процесса наплавки температура образцов составила 500 – 600°С. После наплавки образцы охлаждали в вакууме до температуры 200°С, затем вынимали и дальнейшее охлаждение проходило на воздухе.

В качестве наплавочного материала была использована механическая смесь (табл. 1), состоящая из промышленных порошков хромистого чугуна марки ПГС-27, ванадия и железа с расчетом получения покрытия из хромованадиевого чугуна эвтектического состава. Расчет эвтектического состава выполнен на основании диаграммы состояния многокомпонентных систем на основе железа [13] и данных работы [1].

Таблица 1

Химический состав наплавочного материала

Содержание, масс.%						
Cr	C	Si	Ni	Mn	V	Fe
16	2,5	0,6	1,0	0,7	5	Основа

Микроструктуру покрытий исследовали с помощью оптического микроскопа “AXIOVERT 25CA”. Структурно-фазовое состояние покрытий определяли с использованием микрорентгеноспектрального анализа (МРСА) на приборах Kometax Microbeam, Leo Evo 50 и рентгенофазового анализа на установке ДРОН-3. Микротвердость покрытий определяли на приборе ПМТ-3.

### Результаты и обсуждение

Согласно данным рентгеноструктурного анализа матрица покрытий из эвтектического чугуна имеет

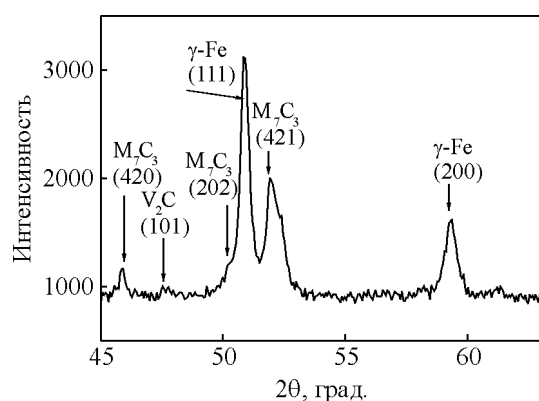


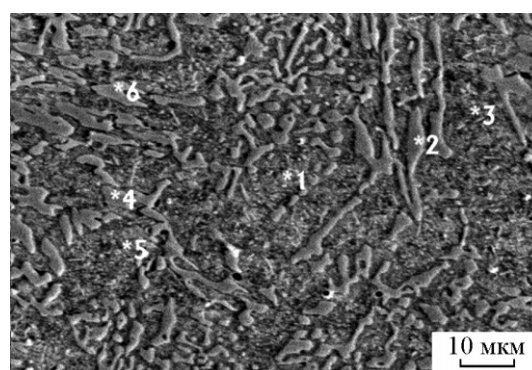
Рис. 1. Фрагмент рентгенограммы покрытия из эвтектического хромованадиевого чугуна после наплавки.

полностью аустенитную структуру ( $\gamma$ -фаза) (рис. 1). Карбидная подсистема представлена двумя карбидами: карбид типа  $M_7C_3$  и карбид ванадия  $V_2C$ . Образование карбида  $V_2C$  в процессе кристаллизации покрытия термодинамически более выгодно, чем VC [9, 10].

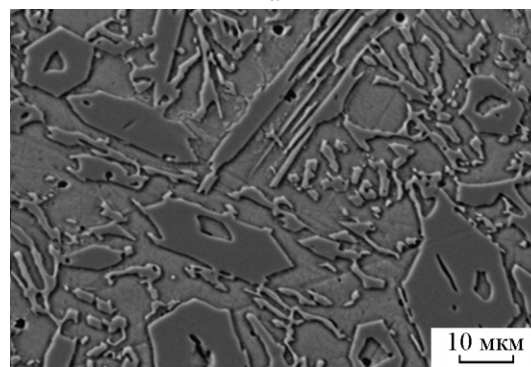
Содержание элементов в карбидной фазе и в матрице по данным VHSF в точках (рис. 2а) представлено в табл. 2. Ванадий находится в покрытиях, как в составе карбидов, так и в составе матрицы. Содержание ванадия в матрице в среднем составляет около 1 масс.%, а хрома — 12 масс. %. Доля ванадия в карбидах составляет величину от 8 до 9 масс.%. Содержание хрома в карбидах — 41 – 45 масс. % и оно примерно соответствует суммарному содержанию элементов ванадия и железа в карбидах.

Сравнительный анализ микроструктуры покрытий из эвтектического хромованадиевого чугуна (рис. 2а) и заэвтектического [4] (рис. 2б), показал, что в эвтектическом чугуне карбидная фаза имеет более мелкодисперсное строение, чем в заэвтектическом. Основной объем покрытий из эвтектического чугуна характеризуется наличием пространственно разветвленного каркаса эвтектических карбидов и отсутствием грубых первичных карбидов характерных заэвтектическим хромистым [1] и хромованадиевым чугунам [4]. Стереометрический микроанализ микроструктуры покрытий показал, что объемная доля карбидов в эвтектическом хромованадиевом чугуне (22%) уменьшилась на 10% по сравнению с заэвтектическим хромованадиевым чугуном (32%). Объемная доля карбидов размером до 3 мкм в покрытии из эвтектического чугуна увеличилась до 67%, против 27% в заэвтектическом чугуне (рис. 3).

Требуемая толщина покрытий при электронно-лучевой наплавке достигается обычно за несколько проходов. В результате некоторого подплавления



а



б

Рис. 2. Микроструктура покрытия из хромованадиевого чугуна: а – эвтектический; б – заэвтектический [4].

Таблица 2

Данные микроанализа рентгеновского спектра покрытия из эвтектического хромованадиевого чугуна (к рис. 2а)

Элементы	Содержание элементов в различных точках					
	матрицы, масс. %			карбидов, масс. %		
	1	3	5	2	4	6
V	1,212	0,943	1,1	9,037	8,714	8,172
Cr	12,637	12,011	10,658	45,895	44,134	41,336
Fe	82,533	84,170	84,639	35,340	37,344	40,151
Общее содержание*	96,386	97,124	96,397	90,272	90,192	89,659

\* — без учета элементов (C, Si, Mn, Ni), входящих в состав покрытия.

подложки из малоуглеродистой стали образуется переходная зона. Анализ данных МРСА показал, что химический состав покрытий фактически плавно изменяется от границы раздела с подложкой к поверхности покрытия в сторону повышения содержания основных легирующих элементов покрытия: хрома и ванадия (рис. 4). Скачкообразные изменения распределения элементов в покрытии связаны с гетерофазной структурой последнего. Минимальные значения на графике соответствуют содержанию элементов в матрице, а в пиковых

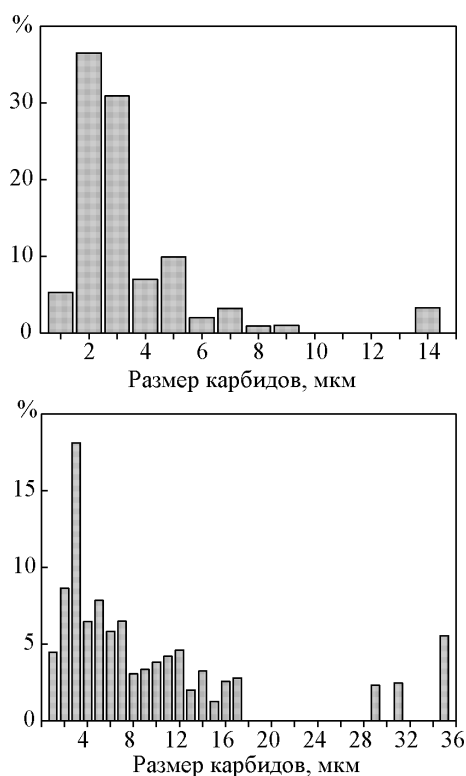


Рис. 3. Распределение карбидов по размерам в покрытиях из эвтектического (а) и заэвтектического (б) хромованадиевого чугуна.

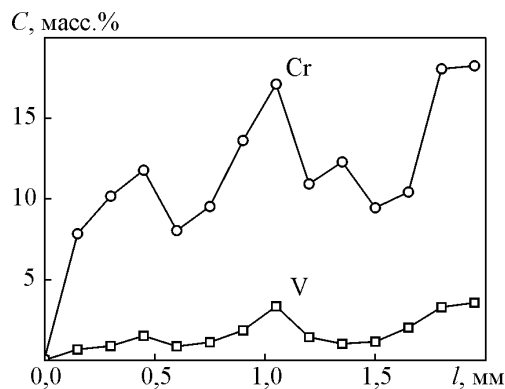


Рис. 4. Распределение хрома и ванадия (в матрице) от границы с подложкой к поверхности покрытия из эвтектического хромованадиевого чугуна.

значениях в зону действия зонда частично попадают карбидные выделения.

Микроструктура переходной зоны (рис. 5) по морфологическим признакам [1] и химическому составу соответствует доэвтектическому чугуну, характеризующемуся большим по объему содержанием матрицы и меньшим — разряженной эвтектики. Такое постепенное изменение по химическому составу и структуре от переходного слоя в основной

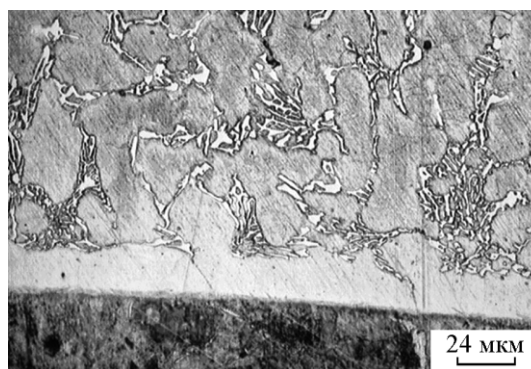


Рис. 5. Микроструктура покрытия из эвтектического хромованадиевого чугуна на границе раздела с подложкой из малоуглеродистой стали.

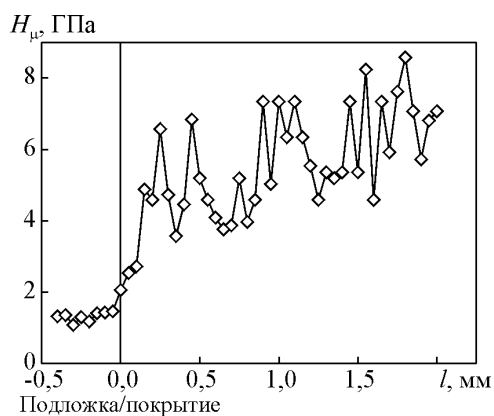


Рис. 6. Распределение микротвердости  $H_{\mu}$  в системе «подложка из малоуглеродистой стали – покрытие из эвтектического хромованадиевого чугуна».

объем покрытия отражается и на характере распределения микротвердости (рис. 6). Микротвердость в области переходного слоя (доэвтектического чугуна) имеет более низкие значения, чем в основном объеме покрытия (эвтектического чугуна).

## Выводы

1. При наплавке порошковой смеси, состоящей из хромистого чугуна марки ПГС-27 с добавлением порошков железа и ванадия, формируется покрытие преимущественно с эвтектической структурой. Доля мелкодисперсных карбидов в таком покрытии увеличивается.

2. Ванадий в покрытиях входит как в состав комплексных карбидов  $(Cr,Fe,V)_7C_3$ , так и в состав аустенитной матрицы. Содержание ванадия в аустенитной матрице составляет около 1%, а в карбидной фазе — 8–9%.

3. При вакуумной электронно-лучевой наплавке эвтектического хромованадиевого чугуна форми-

руется метастабильная аустенитная структура матрицы.

4. На границе раздела с подложкой из малоуглеродистой стали формируется переходный слой из доэвтектического чугуна, переходящий в чугун эвтектического состава.

#### **Литература**

1. Цыпин И.И. Белые износостойкие чугуны. Структура и свойства. М.: Metallurgia, 1983, 176 с.
2. Герек А., Байка Л. Легированный чугун — конструкционный материал. М.: Metallurgia, 1978, 208 с.
3. Рыкалин Н.Н., Зуев И.В., Углов А.А. Основы электронно-лучевой обработки материалов. М.: Машиностроение, 1978, 239 с.
4. Дураков В.Г., Дампилон Б.В., Гнусов С.Ф. Роль мелкодисперсных выделений карбида ванадия в повышении износостойкости покрытий из хромистого чугуна. Упрочняющие технологии и покрытия, 2009, № 5, с. 10 – 14.
5. Прибытков Г.А., Полев И.В., Дураков В.Г. Керметы и электронно-лучевые покрытия системы карбид титана — связка из высокохромистого чугуна. Перспективные материалы, 2002, № 1, с. 70 – 75.
6. Прибытков Г.А., Храмогин М.Н., Коржова В.В., Дураков В.Г. Электронно-лучевые покрытия, наплавленные композиционными порошками карбид титана — легированный высокохромистый чугун. Физика и химия обработки материалов. 2007, № 2, с. 50 – 55.
7. Jia K., Fischer T.E. Abrasion resistance of nanostructured and conventional cemented carbides. Wear, 1996, v. 200, p. 206 – 214.
8. Jia K., Fischer T.E. Sliding wear of conventional and nanostructured cemented carbides. Wear, 1997, v. 203 – 204, p. 310 – 318.
9. Куликов И.С. Термодинамика карбидов и нитридов. Челябинск: Metallurgia Челябинское отделение, 1988, 320 с.
10. Елагина О.Ю. Особенности формирования карбидных фаз с позиции термодинамического подхода. Перспективные материалы, 2006, № 4, с. 17 – 22.
11. Панин В.Е., Белюк С.И., Дураков В.Г. и др. Электронно-лучевая наплавка в вакууме: оборудование, технология, свойства покрытий. Сварочное производство, 2000, № 2, с. 34 – 38.
12. Дураков В.Г., Дампилон Б.В. Электронно-ионный источник. Патент РФ №2378732. Опубликовано 10.01.2010. Бюл. №1.
13. Банных О.А., Будберг П.Б., Алисова С.П. и др. Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа. Справ. Изд. М.: Metallurgia, 1986, 440 с.

*Дампилон Баир Вячеславович — Институт физики прочности и материаловедения СО РАН (г. Томск), кандидат технических наук, научный сотрудник. Специалист в области электронно-лучевой наплавки и сварки. E-mail: dampilon@ispms.tsc.ru.*

*Дураков Василий Григорьевич — Институт физики прочности и материаловедения СО РАН (г. Томск), кандидат технических наук, старший научный сотрудник. Специалист в области электронно-лучевой наплавки и сварки. E-mail: electron@ispms.tsc.ru.*