

УДК 621.793.794.357.7

**ИЗНОС ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ
Fe-Cr-V-Mo-C**

А.С. Дегтерёв, М.С. Кирилкин, И.А. Исакин, С.Ф. Гнусов

Томский политехнический университет
E-mail: Degterev@tpu.ru

Дегтерёв Александр Сергеевич, ассистент кафедры «Оборудование и технология сварочного производства» Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail: Degterev@tpu.ru

Область научных интересов: наплавка износостойких и коррозионностойких покрытий.

Кирилкин Михаил Сергеевич, студент кафедры «Оборудование и технология сварочного производства» Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail: Degterev@tpu.ru

Область научных интересов: наплавка износостойких покрытий.

Исакин Илья Александрович, студент кафедры «Оборудование и технология сварочного производства» Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail: Degterev@tpu.ru

Область научных интересов: наплавка износостойких покрытий.

Гнусов Сергей Федорович, д-р техн. наук, профессор кафедры «Оборудование и технология сварочного производства» Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail: gnusov@rambler.ru

Область научных интересов: использование фазового превращения и эффекта сверхпластичности при формировании композиционных материалов, износостойких покрытий и сварке биметаллического инструмента.

На основе анализа структуры и скорости изнашивания покрытий системы Fe-Cr-V-Mo-C, полученных плазменной наплавкой порошка ПР-Х18ФНМ на постоянном токе обратной и прямой полярностей с поперечными колебаниями плазмотрона и без них в интервалах изменения силы тока 160...250 А и скорости 4,5–8 м/ч, установлены рациональные режимы наплавки, обеспечивающие формирование композиционной структуры, способной эффективно сопротивляться абразивному изнашиванию. Показано, что с увеличением погонной энергии наплавки абразивная износостойкость Fe-Cr-V-Mo-C покрытий снижается, что объясняется увеличением среднего диаметра и уменьшением числа частиц карбида ванадия, уменьшением доли эвтектического карбида и увеличением среднего размера зерен матрицы.

Ключевые слова:

Плазменная порошковая наплавка, Fe-Cr-V-Mo-C сплав, режим, микроструктура, абразивный износ.

Плазменная порошковая наплавка (ППН) используется в машиностроении для восстановления и упрочнения деталей запорной арматуры разнообразного назначения [1–3], клапанов двигателей внутреннего сгорания [4], различного рода режущего инструмента [5] и инструмента для горячего деформирования, а также рабочих органов почвообрабатывающих машин [6]. Широкая номенклатура обрабатываемых изделий и существенные различия в условиях их эксплуатации требуют разработки большего количества присадочных порошков для наплавки. В современной литературе значительный объем работ посвящен вопросам влияния химического состава присадочных материалов на свойства покрытий [7], при этом часто остается нераскрытым влияние технологических параметров наплавки [8, 9], или их выбор связывается лишь с макростроением получаемых упрочняющих слоев [5]. Технология плазменной порошковой наплавки позволяет обеспечить возможность отдельного управления процессами ввода энергии и подачи присадочного материала. Это позволяет формировать близкие по размерам упрочняющие слои, отличающиеся структурой и свойствами. В работах [10, 11] было исследовано влияние технологических параметров режима плазменной порошковой наплавки на структуру естественно-композиционных Fe-Cr-V-Mo-C покрытий.

Целью данной работы является исследование влияния режима плазменной порошковой наплавки на износ покрытий системы Fe-Cr-V-Mo-C.

Материалы и методики исследования

В качестве наплавочного материала в работе использовался промышленный порошок ПР-Х18ФНМ, фракцией от 50 до 200 мкм, следующего химического состава (мас. %): 2,1...2,4 С, 17...19 Cr, 2...3 Ni, 7...8 V, 2...2,6 Mo, Fe – основа. В качестве основного материала использовали пластины из стали 20 размером 250×100×10 мм, поверхность которых предварительно шлифовалась.

Покрyтия наносили на серийно выпускавшейся Всесоюзным научно-исследовательским институтом электросварочного оборудования (ВНИИЭСО) установке УПН-303УХЛ4 с водоохлаждаемым плазмотроном. Для более высокого уровня защиты создаваемых упрочняющих слоев от вредного влияния атмосферного воздуха на плазмотрон устанавливали устройство дополнительного обдува зоны наплавки. В качестве плазмообразующего, транспортирующего и защитного газов применяли аргон высшего сорта. Покрyтия наплавляли за один проход на токах прямой и обратной полярностей при расстоянии от плазмотрона до изделия 10...12 мм, расходе плазмообразующего газа 1...2 л/мин, транспортирующего 10...16 л/мин, для дополнительного поддува до 10...15 л/мин, напряжении на дуге 32...45 В. Основные параметры режимов наплавки с поперечными колебаниями плазматрона частотой 0,3 Гц и без них приведены в табл. 1. Эффективная погонная энергия для всех режимов наплавки рассчитывалась согласно ГОСТ Р ИСО 857-1-2009 «Сварка и родственные процессы. Словарь». Эффективный КПД нагрева изделия дугой принимали равным 0,55...0,63.

Таблица 1. Параметры режимов плазменной порошковой наплавки

Режимы наплавки	Полярность тока	Сила тока, А	Погонная энергия, кДж/см	Скорость наплавки, м/ч	Расход порошка, кг/ч	Размах колебаний, мм
1	Обратная	160	28,2	4,5	1,9	0
2	Обратная	190	35,6	4,5	1,9	0
3	Обратная	220	42,1	4,5	1,9	0
4	Обратная	160	28,2	4,5	1,9	9
5	Обратная	190	35,6	4,5	1,9	9
6	Обратная	220	42,1	4,5	1,9	9
7	Обратная	190	35,6	4,5	1,9	15
8	Обратная	220	42,1	4,5	1,9	15
9	Обратная	190	26,7	6	1,9	0
10	Обратная	220	31,6	6	1,9	0
11	Обратная	220	23,7	8	1,9	0
12	Прямая	160	25,1	4,5	1,45	9
13	Прямая	190	31,4	4,5	1,45	9
14	Прямая	220	35,2	4,5	1,45	9
15	Прямая	190	31,4	4,5	1,9	15
16	Прямая	220	35,2	4,5	1,9	15
17	Прямая	250	31,0	6	1,9	0

Микроструктуру наплавленных покрытий исследовали с помощью оптического микроскопа Olympus GX51, снабженного анализатором изображений SIAMS 700. Частицы карбида ванадия, выявляемые рельефным полированием, исследовали с применением методов дифференциального интерференционного контраста и темнопольного освещения. Для анализа эвтектических карбидов использовали травитель следующего химического состава: 8,3 % $K_3[Fe(CN)_6]$, 8,3 % KOH, 83,4 % H_2O . Травление осуществляли при температуре 20 °С методом погружения образцов, время травления 60 с.

Испытания на износ при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы проводили по ГОСТ 23.208-79 «Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытания материалов на износостойкость при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы». Испытания проводились в течение не менее 165 мин, с определением потери массы образцов через каждые 15 мин. В качестве абразивного материала использовался электрокорунд фракцией менее 400 мкм угловатой формы.

Для изучения эволюции структурно-фазовых превращений в ходе испытаний на износ изнашиваемые поверхности подвергались рентгенофазовому анализу. Исследования фазового состава наплавленных покрытий проводили на дифрактометре Shimadzu XRD 6000 с фильтрованным $Co_{K\alpha}$ – излучением в режиме сканирования в интервале углов 2Θ от 10° до 110° , с шагом $0,1^\circ$. При проведении качественного фазового анализа применялись хорошо известные картотеки. Для количественного фазового анализа использовали значения интегральной интенсивности дифракционных максимумов (111) γ -фазы и (110) для α -фазы.

Результаты и обсуждение

В результате проведения испытаний на износ были построены зависимости скорости изнашивания покрытий, выполненных на различных режимах, от времени испытаний (рис. 1). Каждая из этих зависимостей условно может быть разделена на два участка: первый (I) – участок резкого уменьшения уровня износа с течением времени, связанный с увеличением площади контакта ролика с образцом при формировании лунки изнашивания; второй (II) – участок стабильного износа, на котором происходят малые колебания потери массы образца относительно среднего значения. Протяженность описанных участков изменяется в зависимости от режима наплавки. Время приработки покрытий, наплавленных токами 160 и 220 А, составляет в среднем 85 ± 25 мин, током 190 А – 125 ± 15 мин.

На этапе стабильного износа средняя скорость изнашивания валиков, сформированных током 160 А со скоростью 4,5 м/ч без поперечных колебаний плазмоторона и с размахом колебаний 9 мм, меньше скорости изнашивания за первые 15 мин испытаний на 24...32 %, выполненных током 190 А – на 19...25 %, а током 220 А – на 12...18 %.

Увеличение размаха колебаний плазмоторона до 15 мм при скорости 4,5 м/ч или увеличение скорости наплавки до 6...8 м/ч без поперечных колебаний приводит к увеличению разницы между начальной (за первые 15 минут) и средней скоростью износа покрытий на II этапе. Для упрочняющих слоев, наплавленных током 190 А – это 31...38 %, а током 220 А – 17...30 %.

Анализ значений скорости износа покрытий на втором участке показал, что с увеличением силы тока от 160 до 220 А, при постоянной скорости наплавки, она увеличивается на 10...20 % (рис. 1, а). Увеличение же скорости наплавки от 4,5 до 8 м/ч, при постоянном значении тока, приводит к уменьшению скорости износа покрытий на 15...20 % (рис. 1, б).

В зависимости от режима наплавки средняя скорость изнашивания образцов на втором участке принимает значения от $0,96 \pm 0,01$ до $1,3 \pm 0,03$ мг/мин. Исключением является покрытие, сформированное на токе 250 А и скорости 6 м/ч. Его скорость износа на втором участке достигает в среднем $1,45 \pm 0,06$ мг/мин (рис. 1, в), что превышает на 51 % минимально возможную ($0,96 \pm 0,01$ мг/мин) среднюю скорость износа исследуемых покрытий.

Следовательно, при назначении режима наплавки необходимо опираться не только на геометрию покрытий, долю участия в них металла упрочняемой детали, производительность, отсутствие дефектов, но и на свойства упрочняющих слоев. С этой позиции оптимальными с точки зрения сочетания стабильности износа и износостойкости являются упрочняющие слои, наплавленные током 220 А при скоростях наплавки 6...8 м/ч.

На рис. 1, г, представлена зависимость средней скорости износа на II участке от погонной энергии наплавки. Видно, что с ее увеличением, скорость потери массы Fe-Cr-V-Mo-C покрытий увеличивается.

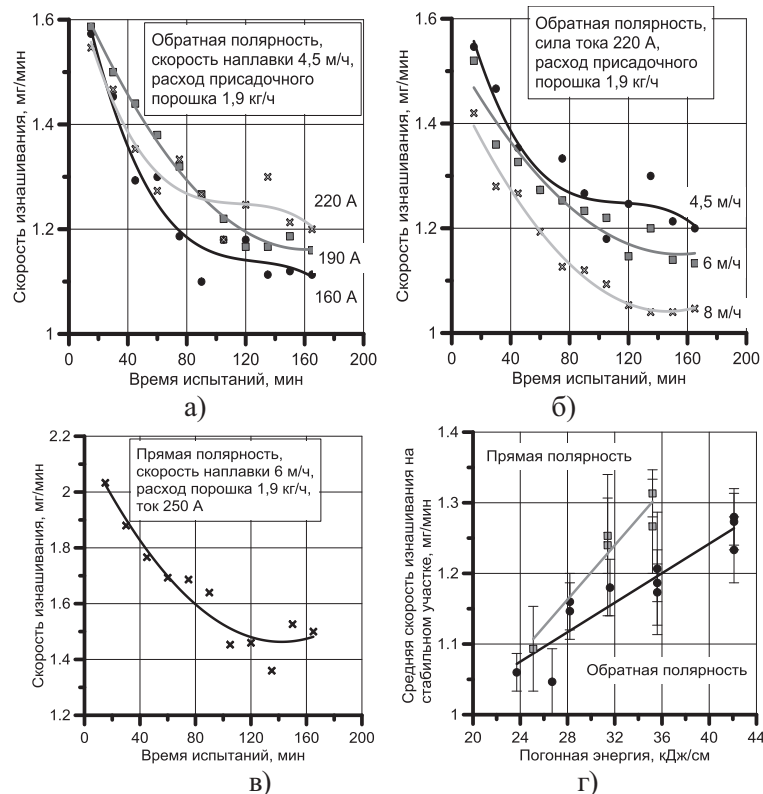


Рис. 1. Зависимости скорости износа образцов от: а–в) времени испытаний; г) погонной энергии

В наших предыдущих работах [10, 11] было показано, что режим наплавки оказывает существенное влияние на микростроение Fe-Cr-V-Mo-C покрытий. Он определяет среднее число частиц карбида ванадия (в интервале от 200 до 850 на площади поверхности равной 10^4 μm^2), их диаметры (в интервале от 1,2 до 1,9 μm), форму (угловатая или игольчатая), долю (в интервале от 8 до 13 %), распределение в объеме покрытий (равномерное или по эллиптическим траекториям), соотношение между α - и γ -твердыми растворами в матрице (5...35/65...95 %), размер зерен матрицы (в интервале от 6 до 11 μm), равномерность распределения эвтектических карбидов (однородное или изменяющееся от границы сплавления к поверхности). Определив влияние режима наплавки на структуру и износ упрочняющих слоев, представляется возможным установить связь между структурой и средним уровнем скорости износа исследуемых покрытий на этапе стабильного изнашивания.

Приведенные на рис. 2 зависимости наглядно демонстрируют, что с увеличением размеров (рис. 2, б) и уменьшением числа частиц карбида ванадия (рис. 2, а), увеличением среднего размера зерен матрицы (рис. 2, в) и уменьшением доли эвтектических карбидов (рис. 2, г) средняя скорость износа покрытий увеличивается. Высокая износостойкость покрытий с дисперсными твердыми частицами карбида ванадия, расположенными на относительно малых расстояниях друг от друга объясняется, во-первых, низкой склонностью таких частиц к выкрашиванию (высокая сила связи на границе раздела карбид-матрица). Во-вторых, с более эффективной, чем в случае крупных частиц VC, защитой матрицы. В-третьих, с локальным полем напряжений, всегда существующим вокруг карбидов и препятствующим свободному движению дислокаций [12].

Вносит свой вклад в износостойкость исследуемых покрытий и средняя доля эвтектических карбидов на основе хрома. По уровню твердости он значительно проигрывает карбиду ванадия и, следовательно, не способен подавить микрорезанье абразивом, а может только его уменьшить [13]. С уменьшением средней доли эвтектического карбида скорость износа образцов увеличивается (рис. 2, г). Также она увеличивается и при увеличении среднего размера зерен матрицы (рис. 2, в), что легко объяснить классическим законом Холла-Петча.

Известно, что абразивная износостойкость композиционных материалов зависит не только от строения, состава и свойств карбидов, но и от фазового состава матрицы, ее способ-

ности к полиморфному превращению [14]. В исследуемых покрытиях с увеличением доли аустенита в матрице уменьшается его склонность к фазовому превращению в ходе внешнего воздействия абразивом, что приводит к увеличению средней скорости износа (рис. 2, д, е). Эти данные полностью согласуются с утверждением о существенном вкладе метастабильного аустенита в повышение износостойкости материалов [15].

Безусловно, оценить вклад каждой фазы и полиморфного превращения в повышение износостойкости покрытий исследуемой системы легирования не представляется возможным, поскольку изменение режима формирования упрочняющего слоя влечет за собой комплексное изменение его структуры. Но в то же время полученные зависимости позволяют описать микроструктуру покрытий, характеризующуюся высокой износостойкостью, и делают возможной сравнительную оценку уровня износа упрочняющих слоев по одной из фаз в них (например, по среднему размеру частиц карбида ванадия или по средней доле эвтектических карбидов).

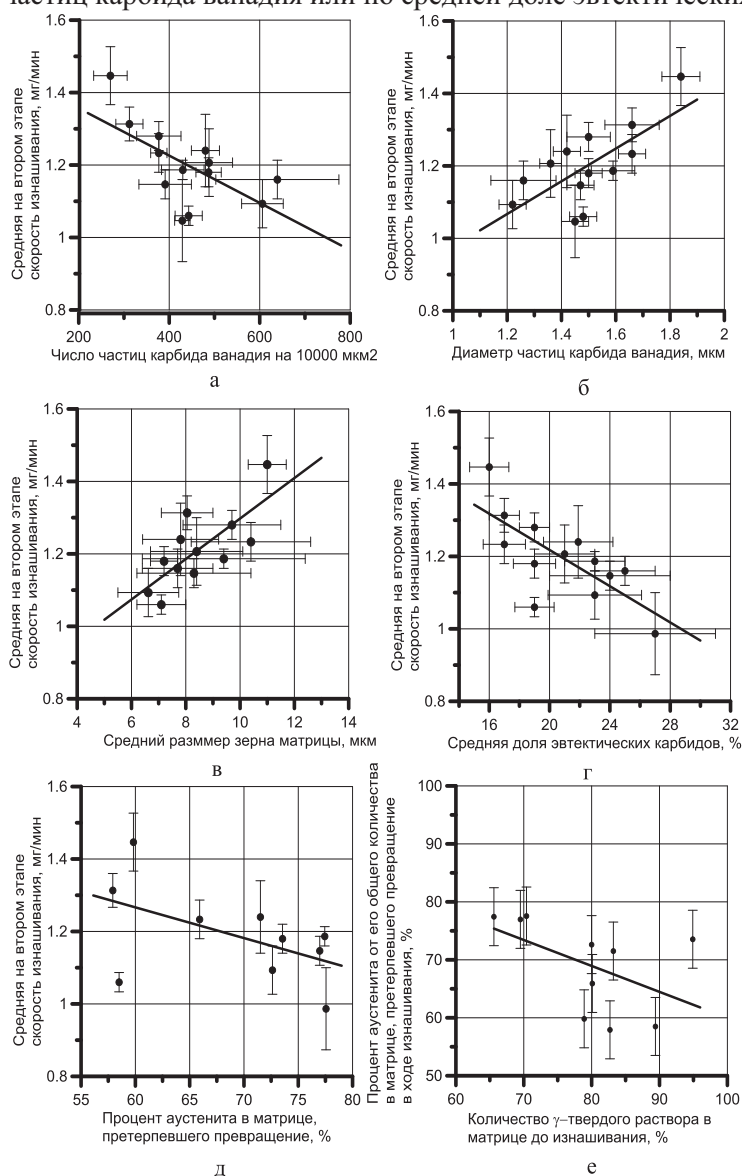


Рис. 2. Зависимости средней на участке стабильного изнашивания скорости износа: а) от числа частиц карбида ванадия в покрытиях; б) от среднего диаметра этих частиц; в) от среднего размера зерен матрицы; г) от средней доли эвтектических карбидов; д) от процента аустенита (от общего его количества в матрице), претерпевшего фазовый переход в ходе изнашивания; е) связь количества аустенита в матрице до изнашивания с процентом аустенита, претерпевшем фазовый переход

Выводы

1. Увеличение погонной энергии наплавки способствует снижению абразивной износостойкости Fe-Cr-V-Mo-C покрытий. В зависимости от режима плазменной порошковой наплавки скорость износа на участке стабильного изнашивания изменяется в интервале от $0,96 \pm 0,01$ до $1,45 \pm 0,06$ мг/мин.
2. Оптимальными с точки зрения сочетания стабильности износа и износостойкости являются упрочняющие слои, наплавленные током 220 А при скоростях наплавки 6...8 м/ч.
3. При ППН исследованных покрытий необходимо выбирать режимы, обеспечивающие формирование композиционной структуры, состоящей из значительного количества (не менее 400 на 10000 мкм² поверхности) малых (средним диаметром не более 1,6 мкм) равноосных упрочняющих частиц, эвтектических карбидов, объемная доля которых превышает 18 % и матрицы, склонной к $\gamma \rightarrow \alpha$ превращению (70...80 % аустенита превращается в мартенсит) со средним размером зерен не более 9,5 мкм.

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания Министерства образования и науки РФ на проведение научно-исследовательских работ № 8.3664.2011.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Переpletчиков Е.Ф., Рябцев И.А. Плазменно-порошковая наплавка деталей запорной арматуры различного назначения // Технологии производства. – 2007. – № 4 (49). – С. 57–61.
2. Старченко Е.Г., Степин В.С., Андреев А.П. Применение дисперсионно-твердеющих Cr-Ni-Si-сталей для элементов затворов и наплавки уплотнительных поверхностей арматуры ТЭС и АЭС // Технологии обработки поверхности. – 2010. – № 3 (66). – С. 66–69.
3. Переpletчиков Е.Ф., Рябцев И.А. Свойства сплавов на основе железа для плазменно-порошковой наплавки уплотнительных поверхностей арматуры // Автоматическая сварка. – 2011. – № 9. – С. 31–35.
4. Переpletчиков Е.Ф. Плазменно-порошковая наплавка клапанов двигателей внутреннего сгорания // Автоматическая сварка. – 2002. – № 1. – С. 45–46.
5. Переpletчиков Е.Ф., Рябцев И.А., Гордань Г.М. Высокованадиевые сплавы для плазменно-порошковой наплавки инструментов // Автоматическая сварка. – 2003. – № 3. – С. 21–25.
6. Гладкий П.В. и др. Плазменная наплавка. – Киев: Экотехнология, 2007. – 292 с.
7. Сом А.И. Плазменно-порошковая наплавка композиционных сплавов на базе литых карбидов вольфрама // Автоматическая сварка. – 2004. – № 10. – С. 49–53.
8. Башмакова Т.Н. Влияние легирования на образование карбидной фазы, структуру и свойства наплавленного металла системы Fe-C-Cr // Автоматическая сварка. – 1998. – № 12. – С. 39–42.
9. Переpletчиков Е.Ф., Рябцев И.А., Васильев В.Г., Хайнце Х. Структура и свойства высокоуглеродистых высокованадиевых сплавов на железной основе для наплавки // Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallor. – 2003. – № 5. – С. 36–40.
10. Дегтерев А.С., Советченко Б.Ф., Трущенко Е.А., Гнусов С.Ф. Влияние технологических параметров плазменной порошковой наплавки на формируемую структуру покрытий системы Fe-Cr-V-Mo-C // Сварка и диагностика. – 2011. – № 4. – С. 13–20.
11. Дегтерев А.С., Гнусов С.Ф. Влияние технологических параметров плазменной порошковой наплавки током прямой полярности на формируемую структуру Fe-Cr-V-Mo-C покрытий // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320. – № 2. – С. 87–94.
12. Попов В.С., Василенко Г.И., Нагорный П.Л. Абразивное изнашивание некоторых высокоуглеродистых сплавов // Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallor. – 1970. – № 5. – С. 47–48.
13. Wei S., Zhu J., Xu L. Research on wear resistance of high speed steel with high vanadium content // Materials Science and Engineering A. – 2005. – V. 404. – № 1–2. – P. 138–145.
14. Попов В.С., Попов С.М. Соппротивление абразивному износу аустенитных сплавов // Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallor. – 1972. – № 1. – С. 65–66.
15. Счастливец В.М., Филиппов М.А. Роль принципа метастабильности аустенита Богачева-Минца при выборе износостойких материалов // Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallor. – 2005. – № 1. – С. 6–9.

Поступила 10.07.2012 г.