

КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ИЗНОСОСТОЙКИХ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ, НАПЛАВЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОННЫМИ ПУЧКАМИ В ВАКУУМЕ

М.В. Радченко, Ю.О. Шевцов, В.Г. Радченко

По мере возрастания требований к условиям эксплуатации современных технических устройств, в частности к износостойкости их поверхности, в создании защитных покрытий все более возрастает роль концентрированных потоков энергии. Так, например, использование электронных пучков в вакууме позволяет создавать износостойкие покрытия с уникальными свойствами в режиме энерго- и ресурсосбережения [1,2].

При этом известно, что триботехнические свойства материала покрытия определяются в первую очередь его химическим составом, а также структурно-фазовым состоянием, формируемым в процессе кристаллизации расплава.

В данной работе приводятся результаты комплексного анализа защитных покрытий, наплавленных электроннолучевым методом в вакууме с использованием промышленно выпускаемых порошковых самофлюсующихся сплавов на основе Ni. Характерная карбидонасыщенная структура электроннолучевой наплавки таких сплавов представлена на рисунке 1.

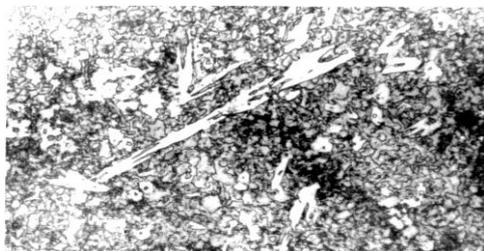


Рисунок 1 – Микроструктура покрытия, наплавленного самофлюсующимся порошковым сплавом ПР-Н70Х17С4Р4.

Игольчатые и мелкие многогранные карбиды в пластичной никелевой матрице (600^x)

Испытаниям на износостойкость были подвергнуты образцы с покрытиями из сплавов ПР-Н70Х17С4Р4, ПГ-12Н03 и ПГ-СР4 с различным соотношением легирующих элементов, наплавленными на различной удельной мощности электронного луча $q_1 \dots q_5$ от $1,5 \cdot 10^5$ до $4,2 \cdot 10^5$ Вт/см² ($U_a = 22$ кВ, $I_n = 60 \dots 150$ мА, $d_n = 1,0$ мм, $V_n = 2$ мм/с).

Как следует из рисунка 2, 3 лучшую износостойкость имеют слои, наплавленные при удельной мощности от $2 \cdot 10^5$ до $3 \cdot 10^5$ Вт/см². Полученные данные коррелируют с предыдущими исследованиями авторов, показавшими, что именно в этом диапазоне режимов наплавки самофлюсующиеся сплавы имеют наиболее измельченную структуру и более равномерно распределенные кристаллические образования карбидных и карбоборидных фаз.

Результаты исследований по профилированию поверхности шлифов на сканирующем электронном микроскопе Tesla BS - 300 позволяют сделать вывод о различном механизме изнашивания покрытий, наплавленных на удельных мощностях $q_1 = 1,5 \cdot 10^5$ Вт/см² и $q_3 = 2,5 \cdot 10^5$ Вт/см² ($U_a = 22$ кВ, $I_n = 60$ мА и 90 мА, $d_n = 1,0$ мм, $V_n = 2$ мм/с). Изучение поверхности шлифов слоев, наплавленных на плотности мощности - q_1 показало, что очагами разрушения являются первичные кристаллы упрочняющей фазы, имеющие укрупненную направленную форму и являющиеся концентраторами напряжений матрицы твердого никелевого раствора. В покрытиях, наплавленных на плотности мощности - q_3 мелкодисперсное строение упрочняющих фаз способствует образованию гладкой поверхности изнашивания, практически лишенной острых выступов.

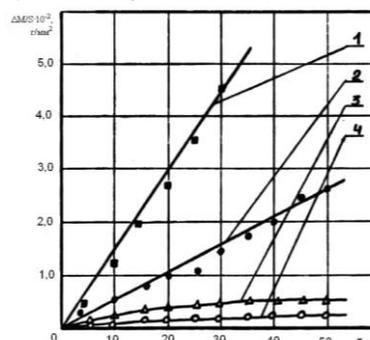


Рисунок 2 – Кинетика абразивного износа сплавов после ЭЛН (удельная нагрузка на образец $P_{уд} = 4$ г/мм²):
1 – сталь 45, 2 - ПГ-12Н03,
3 - ПР-Н70Х17С4Р4, 4 - ПГ-СР4

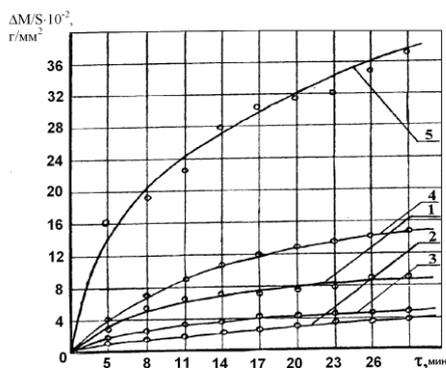
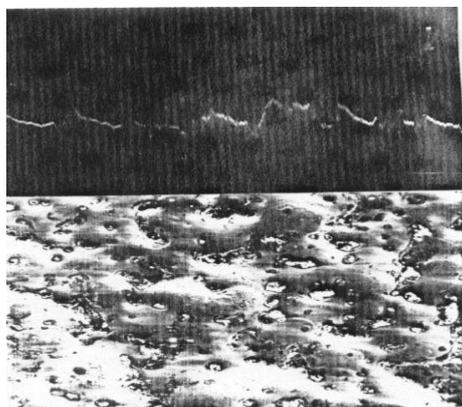
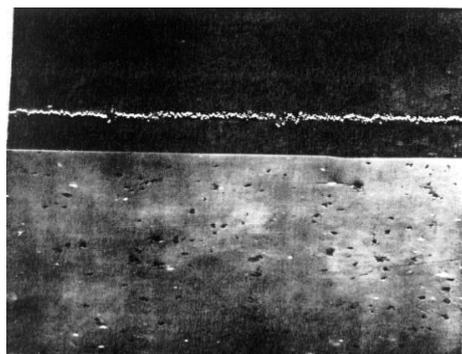


Рисунок 3 – Сравнительные испытания износостойкости покрытий (ПГ-СР4) на различных режимах ЭЛН: (удельная нагрузка на образец $P_{уд} = 8 \text{ г/мм}^2$): 1...4 - $q_1...q_4$, 5 – сталь 45



а)



б)

Рисунок 4 – Профилограммы и фотографии поверхности (а) наплавленного покрытия и шлифа (б). Сплав ПГ-СР4 ($600\times$)

Как показали результаты анализа защитного слоя, наплавленного по первому режиму, разрушение при изнашивании происходит за счет выкрашивания отдельных круп-

ных карбидных составляющих. Повышенная дисперсность структуры покрытий, полученных на третьем режиме, снижает количество очагов разрушений, что положительно сказывается на износостойкости в целом. При повышении плотности мощности до $4 \cdot 10^5 \text{ Вт/см}^2$ карбидные фазы растворяются в сравнительно мягкой аустенитной матрице, становятся существенно более мелкими и затрудняют процесс удаления материала наплавки при срезании его частицами абразива (рисунок 5).

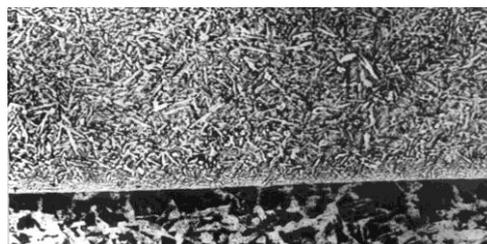


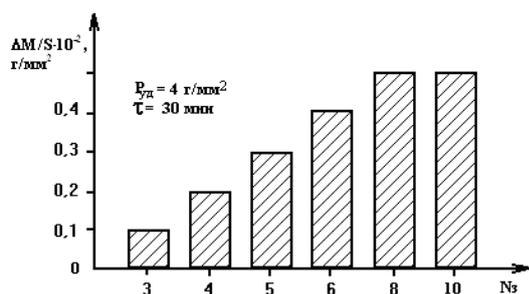
Рисунок 5 – Микроструктура покрытия, наплавленного самофлюсующимся порошковым сплавом ПР-Н70Х17С4Р4. Измельченные распределенные карбиды. ($600\times$)

Далее были выявлены зависимости изменения износостойкости (\mathcal{E} , г/мм^2) наплавленного сплава ПГ-СР4, полученного на режиме $q = 2,52 \cdot 10^5 \text{ Вт/см}^2$ ($U_a = 22 \text{ кВ}$, $I_n = 90 \text{ мА}$, $d_n = 1,0 \text{ мм}$, $V_n = 2 \text{ мм/с}$) от различных условий испытания, т.е. при различной зернистости шлифовальной шкурки (рисунок 6.а) и удельной нагрузке на образец (рисунок 6.б).

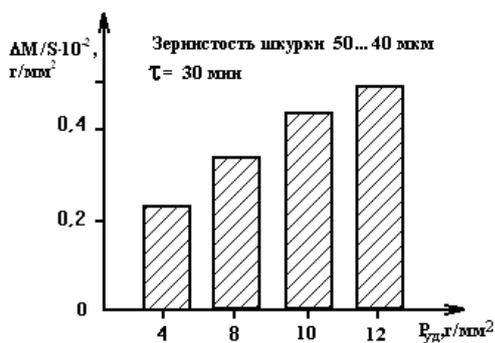
Как было показано выше, среди широкого спектра выпускаемых промышленностью порошковых сплавов, используемых для нанесения в качестве покрытий на поверхность изделий, высоколегированные порошковые сплавы аустенитного класса на основе никеля в наибольшей степени отвечают требованиям сочетания относительно низкой стоимости (в сравнении, например, со сплавами на основе кобальта), высокой твердости и износостойкости.

Однако несомненный интерес представляет возможность создания композиций на основе таких сплавов с дополнительным насыщением их различными упрочняющими фазами, в качестве которых могут служить карбиды, бориды и карбобориды тугоплавких металлов.

КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ИЗНОСОСТОЙКИХ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ, НАПЛАВЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОННЫМИ ПУЧКАМИ В ВАКУУМЕ



а)
зернистость (N₃)
3 - 40...28 мкм; 4 - 50...40 мкм;



б)
5 - 63...50 мкм; 6 - 80...63 мкм;
8 - 100...80 мкм; 10 - 125...100 мкм;
удельная нагрузка

Рисунок 6 а,б – Износостойкость наплавленных покрытий в различных условиях испытаний

В данном разделе работы рассмотрен вопрос взаимосвязи сопротивления такого рода покрытий изнашиванию со структурными параметрами карбидонасыщенных композиций.

Наплавка защитных покрытий в вакууме была выполнена на лабораторной установке по режимам, которые подбирали, исходя из следующих требований:

1) общая мощность электронного пучка должна обеспечивать полное расплавление порошкового сплава и его перемешивание с защищаемой поверхностью на небольшую глубину;

2) траектория перемещения пучка по поверхности металла должна обеспечивать плотность мощности, достаточную для расплавления порошкового сплава, но не больше значения, при котором происходит его удаление реактивной струей парогазовой фазы;

3) геометрические размеры наплавленного защитного слоя (ширина, высота) должны соответствовать существующим представ-

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК №2 (ч. 2) 2005

лениям о размерах защитных и упрочняющих покрытий на деталях машиностроения и инструменте.

Высота наплавки на поверхность изношенных восстанавливаемых или вновь создаваемых деталей и инструмента находится, чаще всего в пределах 2...4 мм. Отсюда эмпирически выбраны следующие режимы наплавки:

- ускоряющее напряжение в электронной пушке $U_a=25$ кВ,
- ток электронного пучка $I_n=60...120$ мА,
- скорость перемещения луча по поверхности $V_n=1,0...2,6$ мм/с,
- массовый расход порошка $G_n=1,5...4,0$ кг/ч.

С целью повышения твердости и износостойкости наплавленного металла был выполнен анализ влияния легирующих элементов на свойства указанных сплавов, и на этой основе создан ряд порошковых композиций с добавками карбидов хрома, ванадия и диборида хрома.

Необходимость добавок карбида хрома определяется тем, что хрома, присутствующего в исходном сплаве (ПР-Н70Х17С4Р4), судя по результатам рентгеноструктурного анализа, недостаточно для образования необходимого количества карбидов как высокотемпературной упрочняющей фазы (HV 13000 МПа, $T_{пл}=2170$ °С). Карбид ванадия обладает еще большей твердостью - 24000 МПа, что также способствует повышению износостойкости.

Добавки в матричный состав диборида хрома благоприятно сказываются на формировании наплавленного сплава в целом, т.к. при расплавлении порошка происходит образование легкоплавкой эвтектики и более равномерное распределение карбидных включений по всему объему наплавленного металла.

По этим соображениям для проведения исследований твердости и износостойкости было подготовлено семь порошковых композиций, которые были наплавлены на углеродистую сталь 20.

Результаты испытаний наплавки полученных композиций на твердость и износостойкость в условиях сухого трения о жестко закрепленные абразивные частицы представлены на рисунке 7, а изменение фазового состава - на рисунке 8.

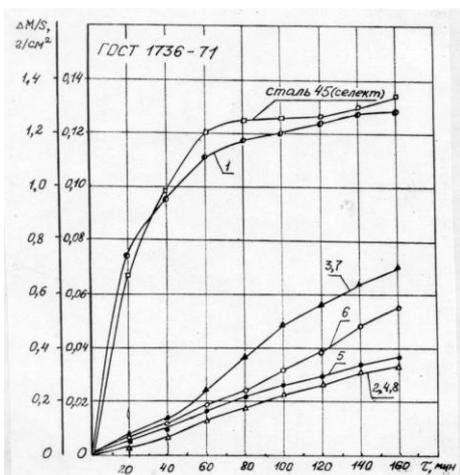


Рисунок 7 – Кинетика абразивного изнашивания наплавленных сплавов:
 1 - ПР-Н70Х17С4Р4 (основа);
 2 - основа + 10 % CrB₂; 3 - основа + 20 % CrB₂; 4 - основа + 10 % CrB₂ + 10 % VC;
 5 - основа + 20 % CrB₂ + 20 % VC; 6 - основа + 10 % CrB₂ + 10 % VC + 10 % Cr₃C₂; 7 - основа + 20 % CrB₂ + 20 % VC + 20 % Cr₃C₂; 8 - ПС-12НВК-01 Абразив - корунд (ГОСТ 21963-87).
 Левая шкала для стали 45

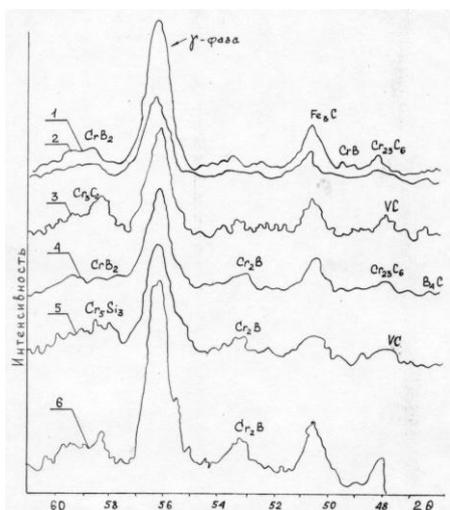


Рисунок 8 – Рентгенограммы наплавленных сплавов:
 1 - ПР-Н70Х17С4Р4 (основа); 2 - основа + 10 % CrB₂; 3 - основа + 20 % CrB₂; 4 - основа + 10 % CrB₂ + 10 % VC 5 - основа + 20 % CrB₂ + 20 % VC; 6 - основа + 10 % CrB₂ + 10 % VC + 10 % Cr₃C₂

Сравнительный анализ фазового состава наплавки исходного матричного состава показал, что в наплавленном металле образуются бориды хрома типа CrB₂, Cr₅B₃, силициды никеля, являющиеся упрочняющими

фазами в пластичной γ-фазе на основе Ni. Добавление в матричный состав 10 % CrB₂ увеличивает количество этой фазы в наплавленном металле и приводит к образованию при кристаллизации расплава сложного карбида типа Cr₂₃C₆. Это служит объяснением резкого повышения износостойкости сплава в аналогичных условиях испытаний на сухое трение о жестко закрепленные абразивные частицы.

Увеличение составляющей диборида хрома до 20 % приводит к увеличению твердости наплавленного металла, но это же способствует увеличению размеров структурных составляющих (упрочняющих фаз), и снижению износостойкости за счет скалывания и выкрашивания более крупных, чем в первом случае, твердых частиц карбидов.

С целью устранения этого недостатка и повышения износостойкости была выполнена композиция с добавками в матричный состав 10 % CrB₂ и VC. В структуре покрытия, наплавленного этим составом, наблюдается значительное (в 3...4 раза) измельчение размеров структурных составляющих, которое объясняется присутствием в расплаве ванадия. Кроме того, в структуре появились игольчатые включения карбида ванадия, что подтверждено рентгеноструктурным анализом. Такая композиция обеспечила повышение твердости до 66 HRC и износостойкости до ε = 34,31 %.

С учетом добавок в состав наплавки карбида ванадия как элемента, измельчающего зерно металла, с целью дополнительного легирования матричного состава металлической системы Ni-Cr-B-Si было увеличено количество хромборида до 20 %. Это привело к увеличению в закристаллизованном металле покрытия количества карбидов хрома и созданию легкоплавкой эвтектики, способствующей равномерному распределению в наплавке карбидной фазы. Однако в результате наплавки была сформирована менее благоприятная, чем в предыдущем случае, структура: помимо ледебуритной эвтектики в структуре образовалась сетка разобщенных карбидных включений, способствующая выкрашиванию карбидной фазы. Тем не менее, установлено, что показатели твердости и износостойкости, выявленные в процессе испытаний этого сплава имеют высокие значения: 68 HRC, ε = 33,46 %.

Добавление в основной порошок состав по 10 % каждой из фаз (CrB₂, VC, Cr₃C₂) привело к тому, что часть легирующих элементов растворилась в аустените, а часть

КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ИЗНОСОСТОЙКИХ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ, НАПЛАВЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОННЫМИ ПУЧКАМИ В ВАКУУМЕ

образовала карбидные и боридные фазы. В целом по сравнению с матричным составом это привело к значительному повышению показателей твердости (66 HRC) и износостойкости ($\epsilon = 24,47\%$), но эти показатели ниже, чем при более экономном легировании.

Дополнительное увеличение добавок карбидов до 20 % каждой закономерно привело к значительному увеличению твердости наплавленного металла - до 69 HRC [3]. Но при его испытаниях на изнашивание было установлено, что укрупнение карбидной фазы вызвало более интенсивное ее выкрашивание из аустенитной матрицы сплава.

Таким образом, на основе анализа и экспериментальных исследований влияния легирующих элементов на металлургические и физико-механические свойства наплавленных покрытий установлено следующее:

1. Для создания защитных износостойких покрытий методом электроннолучевой порошковой наплавки в вакууме среди легирующих элементов наиболее предпочтительными являются такие, которые способствуют образованию упрочняющих фаз типа карбидов, карбоборидов тугоплавких металлов, сохраняющих свои свойства как при высокотемпературном нагреве, так и после перекристаллизации.

2. Дополнительное легирование матричного состава износостойких порошков на основе Ni-Cr-B-Si наиболее целесообразно выполнять при суммарном содержании карбидообразующих фаз в пределах 20...30 %. При этом обеспечиваются высокие показатели твердости и износостойкости (до 69 HRC и $\epsilon = 34,31\%$).

3. Для одновременного измельчения структурных составляющих и увеличения количества карбидной фазы в наплавленном металле (как по структурным, так и по экономическим соображениям) более предпочтительным является использование карбидов ванадия, чем карбидов вольфрама (как в сплаве ПС-12НВК-01), при достаточно близких показателях твердости и износостойкости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радченко М.В., Радченко В.Г., Шевцов Ю.О., Жебряков О.Ю. Комбинированная технология создания защитных покрытий на панелях котлов модульного типа // Сб. научных трудов международной конференции «Сварка и родственные технологии».- Киев, Украина; Изд-во ИЭС им Е.О.Патона, 2002.- С.34.

2. Чередниченко В.С., Радченко М.В., Радченко Т.Б., Шевцов Ю.О., Радченко В.Г., Шевцов Ю.О., Хомутов О.И. Комбинированные электротехнологии нанесения защитных покрытий / Отв. Редакторы В.С.Чередниченко, В.Г.Радченко.- Новосибирский государственный технический университет. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004.- 260 с.- (Серия «Современные электротехнологии», Т.6).

3. А.с. № 1812815 «Порошковый твердый сплав».

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова