

## ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ВНЕВАКУУМНАЯ НАПЛАВКА ХРОМСОДЕРЖАЩИХ ПОКРЫТИЙ НА НИЗКОУГЛЕРОДИСТУЮ СТАЛЬ

И.М. Полетика, М.Г. Голковский<sup>1)</sup>, М.В. Перовская, Т.А. Крылова  
 Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск,  
 пр. Академический 2/1; Тел.: +7 3822 286858, Факс: +7 3822 492576, E-mail: [poletika@list.ru](mailto:poletika@list.ru)  
<sup>1)</sup> Институт ядерной физики СО РАН, г. Новосибирск, пр. Лаврентьева 11;  
 Тел.: +7 383 3394250, Факс: +7 383 330-71-63, E-mail: [golkovsk@inp.nsk.su](mailto:golkovsk@inp.nsk.su)

Проведены эксперименты по наплавке в пучке релятивистских электронов смесей порошков хрома и карбида хрома на низкоуглеродистую сталь Ст3. Исследованы структура и фазовый состав наплавленных слоев, определено в них содержание хрома. Изучено распределение микротвердости, проведены испытания на коррозионную стойкость и абразивный износ. Показано, что износостойкость наплавленных слоев определяется не только твердостью, но и характером образующейся структуры. Коррозионная стойкость зависит от количества хрома в наплавляемой смеси и растет при увеличении в ней соотношения компонентов Cr/C. Подобран оптимальный режим наплавки, позволяющий получить на стали Ст3 хромсодержащие покрытия, обладающие одновременно высокими значениями износостойкости и коррозионной стойкости.

### Введение

Модифицирование поверхности металлов и сплавов позволяет увеличить срок службы и повысить надежность работы деталей машин и механизмов. Значительный прогресс достигнут в технологии вакуумной электронно-лучевой наплавки металлов и сплавов [1-3]. Недостатком этих установок является необходимость проведения обработок в вакууме, что затрудняет облуживание крупносерийных и крупногабаритных изделий и введение легирующих элементов, и небольшая глубина проникновения электронного пучка в металлы (<1 мкм).

Новый метод облучения изделий на ускорителе релятивистских электронов, позволяющий выводить электронный пучок в атмосферный воздух [4-5], лишен перечисленных недостатков. Ускоритель обеспечивает глубокое проникновение электронов в металлы и высокую скорость обработки поверхности. Глубина проплавления колеблется от 0,1 до 10 мм.

Известно, что повышение абразивной износостойкости может быть достигнуто путем создания в наплавленном слое гетерогенных структур, содержащих большое количество твердых включений, например, карбидов хрома [6-7]. Хром вводят также для повышения устойчивости стали к коррозии. Защитная пленка оксидов (Cr, Fe)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> затрудняет контакт с окружающей средой и резко снижает скорость коррозии [8]. Таким образом, хром является легирующим элементом, который может обеспечить формирование износостойких и коррозионно-стойких покрытий одновременно.

Целью работы явилось создание на низкоуглеродистой стали хромсодержащих покрытий методом наплавки в пучке релятивистских электронов смесей порошков хрома и карбида хрома в различных весовых соотношениях.

### Материалы и методы исследования

В качестве подложки для наплавки использовалась низкоуглеродистая сталь Ст3, соответствующая ГОСТ 380 – 94, на которую в пучке релятивистских электронов наплавляли одно- и двухслойные покрытия с использованием для наплав-

ки порошковых смесей на основе карбида хрома Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> (остальное флюс) и карбида хрома в смеси с чистым хромом в отношениях Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>/Cr=1 и 2. Энергия электронов равнялась 1,4 МэВ, ток пучка 26-27 мА. Расстояние от выпускного окна до поверхности образца составляло 9 см, диаметр пучка 1,2 см. Ускоритель работал в режиме сканирования с амплитудой колебания пучка 5 см и скоростью поступательного перемещения образца под пучком 1 см/с.

Структуру металла наплавки исследовали на металлографическом микроскопе «Neophot» и на электронном микроскопе ЭМВ-100Б методом экстрагирующих угольных реплик, оттененных окисью вольфрама. Рентгеноструктурный фазовый анализ производили на дифрактометре ДРОН-2М. Распределение легирующих элементов в наплавленных слоях изучали на рентгеновском микроанализе CAMEBAX, включающем растровый микроскоп, что позволяло определять концентрацию хрома в различных структурных составляющих (зерно, эвтектика).

На приборе ПМТ-3 измеряли распределение микротвердости в наплавленных слоях. Проводили испытания на абразивный износ о жестко закрепленные абразивные частицы, (ГОСТ 23.208-79). Коррозионную стойкость определяли путем измерения потери массы образца при выдержке в азотной кислоте.

### Результаты и обсуждение

Исследование показало, что в наплавляемом слое протекает дендритно-ячеистая кристаллизация и образуется структура, состоящая из зерен твердого раствора и эвтектики. Объемная доля эвтектической составляющей, которую определили методом секущей по фотографиям микроструктуры, зависит от содержания карбида хрома в легирующей смеси (от количества вводимого с карбидом углерода) и от числа наплавляемых слоев.

По данным рентгеноструктурного фазового анализа зерна дендритов и основа эвтектики представляют собой чистый аустенит. Ферритная составляющая в структуре не обнаружена. Со-

хранение аустенитной фазы в покрытии объясняется сверхвысокими скоростями охлаждения при наплавке в пучке релятивистских электронов ( $10^3$ - $10^4$  K/c) и высоким содержанием легирующих элементов хрома и углерода в наплавленном слое. Известно, что в высокоуглеродистых сталях с большим содержанием легирующих элементов точка начала мартенситного превращения снижается в область отрицательных температур, и количество остаточного аустенита повышается. В углеродистой стали, содержащей порядка 1% хрома, количество нераспавшегося аустенита может достигать 100%. В нашем случае, по данным рентгеновского микроанализа, среднее содержание хрома в слое наплавки для различных режимов облучения составляет 15-30 вес.%.

При наплавке порошком карбида хрома  $Cr_3C_2$  в эвтектике выделяются карбиды  $Cr_7C_3$ . Введение в легирующую смесь чистого хрома и увеличение отношения количества хрома к количеству углерода создают условия для выделения карбида  $Cr_{23}C_6$  с большим количеством хрома, чем в карбиде  $Cr_7C_3$ . В структуре наблюдаются два типа карбидов -  $Cr_7C_3$  и  $Cr_{23}C_6$ .

Распределение хрома в наплавленном слое для всех использованных пяти режимов наплавки определено методом рентгеновского микроанализа. Оно носит характер локальных колебаний, что связано с чередованием участков эвтектики и зерен твердого раствора в структуре.

Распределение микротвердости в наплавленных слоях, как и распределение хрома, носит характер локальных колебаний, что также обусловлено неоднородностью структуры наплавки. Среднее значение микротвердости в слое повышается с ростом количества эвтектической составляющей, т.е. с увеличением содержания карбида хрома в легирующей смеси (рис. 1а). При этом, как показывает анализ, изменение величины  $H_{\mu}^{CP}$  коррелирует с изменением объемной доли эвтектики и содержанием хрома в эвтектике и зернах твердого раствора.

Результаты измерения коэффициента износостойкости приведены на рис. 1 б. Видно, что простой связи между твердостью и износостойкостью нет – эти величины не коррелируют друг с другом. С увеличением твердости износостойкость в одних случаях увеличивается, а в других уменьшается. Из литературных данных известно [6-8], что помимо твердости, важное значение имеет характер образующейся структуры – количественное соотношение структурных составляющих, их расположение, форма, размеры, кристаллографическое строение выделяющихся фаз, состояние матрицы. Твердость не является единственным критерием для создания износостойких слоев наплавленного металла. В работе [9] показано, что при абразивном изнашивании наплавленных сплавов с переменным содержанием углерода и марганца при одном и том же значении твердости износостойкость может различаться более чем в два раза.

Из рис. 1 видно, что, несмотря на существенное повышение твердости за счет роста объемной доли эвтектики при нанесении двухслойных покрытий, износостойкость падает. Отсюда сле-

дует, что увеличение количества карбидов с точки зрения износостойкости материала целесообразно лишь до определенных пределов. Чрезмерное количество карбидов, по-видимому, меняет механизм изнашивания – карбиды начинают выкрашиваться, а не истираться.

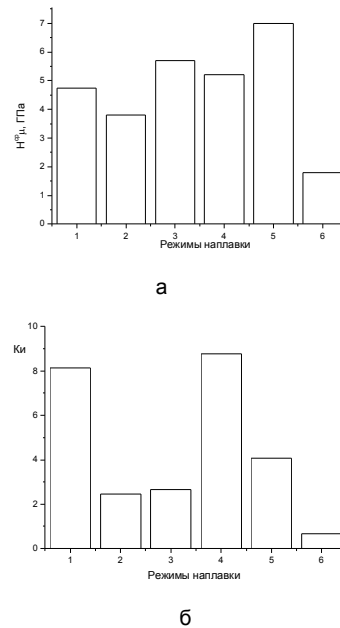


Рис. 1. Зависимость среднего значения микротвердости (а) и коэффициента износостойкости (б) в поверхностном слое от режима наплавки: 1 -  $Cr_3C_2$ ; 2 -  $Cr_3C_2$ / Cr=1, 1 слой; 3 -  $Cr_3C_2$ / Cr=1, 2 слоя; 4 -  $Cr_3C_2$ / Cr=2, 1 слой; 5 -  $Cr_3C_2$ / Cr=2, 2 слоя; 6 – сталь Ст3.

Согласно полученным данным, объемная доля эвтектики в наплавленном слое не должна превышать 40%. Это соответствует результатам исследований, приводимым в работе [6], где показано, что оптимальная объемная доля карбидов в слое электродуговой наплавки для образцов, работающих в условиях абразивного износа, должна составлять 35-40%. Больше количество приводит к разрушению частиц карбидов, поскольку возникающие на них высокие концентрации напряжений уже не гасятся тонкими прослойками металлической матрицы.

Результаты измерений коррозионной стойкости образцов в концентрированной азотной кислоте представлены на рис. 2. Видно, что сталь Ст3 обладает низкой коррозионной стойкостью (кривая 1). Коррозионная стойкость слоев наплавки ниже коррозионной стойкости стали 12X18H10T (кривые 2, 3, 4, 5, 6), но существенно выше, чем стали Ст3. Коррозионная стойкость возрастает при введении в легирующую смесь дополнительного количества хрома, ответственного за коррозионную стойкость, и увеличении соотношения компонентов Cr/C (сравни кривые 2, 3, 4, 5, 6).

Из сопоставления полученных результатов испытаний на износостойкость и коррозионную стойкость (рис. 1б и 2) следует, что наиболее эффективные бифункциональные (износостойкие и коррозионно-стойкие одновременно) покрытия

на стали Ст3 могут быть получены однослойной наплавкой порошковых смесей  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  и Cr в весовом соотношении 2:1. При меньшем соотношении  $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{Cr}=1$  износостойкость уменьшается в связи с уменьшением количества твердой карбидной составляющей в структуре.

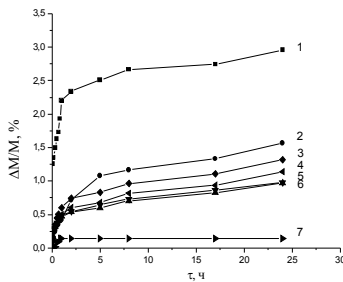


Рис. 2. Зависимость относительной потери массы образцов сталей и наплавленных покрытий от времени выдержки в азотной кислоте: 1 - Ст3; 2 - наплавка  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ ; 3 -  $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{Cr}=2$ , 1 слой; 4 -  $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{Cr}=2$ , 2 слоя; 5 -  $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{Cr}=1$ , 1 слой; 6 -  $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{Cr}=1$ , 2 слоя; 7 - сталь 12Х18Н10Т.

При использовании двухслойной наплавки вместо однослойной износостойкость падает, так как выделение слишком большого количества карбидов способствует их выкрашиванию – тонкие прослойки аустенитной фазы не удерживают частицы включений в структуре эвтектики. Наплавка одним карбидом  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ , хотя и способствует существенному увеличению износостойкости, характеризуется пониженной коррозионной стойкостью из-за недостаточного содержания хрома в твердом растворе.

### Выводы

1. При электронно-лучевой наплавке порошковыми смесями карбида хрома с хромом в поверхностных слоях протекает дендритно-ячеистая кристаллизация с образованием структуры, состоящей из зерен аустенита и эвтектики, включающей карбиды  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  и  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ . Значения твердости определяются объемной долей эвтектики.

2. Корреляция между значениями твердости и износостойкости отсутствует, поскольку увеличение объемной доли эвтектики целесообразно лишь до определенных пределов – 35-40%. Чрез-

мерное количество карбидов приводит к их выкрашиванию и падению износостойкости, несмотря на увеличение твердости.

3. Коррозионная стойкость слоев наплавки существенно выше, чем используемой в качестве подложки стали Ст3, и возрастает при дополнительном введении в наплавляемую смесь порошка чистого хрома и увеличении соотношения компонентов Cr/C.

4. Оптимальное сочетание износостойкости и коррозионной стойкости в бифункциональных покрытиях на стали Ст3 может быть получено однослойной наплавкой порошковых смесей на основе  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  и Cr в весовом соотношении 2:1.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 05-03-32402-а).

### Список литературы

1. Пობоль И.Л. Модифицирование металлов и сплавов электронно-лучевой обработкой. // МиТОМ. – 1990. - №7. – С. 42-47.
2. Радченко М.В., Батырев Н.И., Тимошенко В.Н. Структура и свойства индукционных и электронно-лучевых наплавов из порошкообразных материалов. // МиТОМ. – 1987. - №7. – С. 58-60.
3. Панин В.Е., Дураков В.Г., Прибытков Г.А., Полев И.В., Белюк С.И. Электронно-лучевая наплавка порошковых карбидосталей. // ФиХОМ. – 1998. - №6. – С. 53-59
4. Ауслендер В.Л., Салимов Р.А. Ускоритель электронов Института ядерной физики СО АН СССР для народного хозяйства. // Атомная энергия. – 1978. – Т. 44. - Вып. 5. – С. 403-405.
5. Скринский А.Н., Мизин В.Г., Фоминский Л.П. и др. Высокопроизводительная наплавка и оплавление порошковых покрытий пучком релятивистских электронов. // ДАН СССР. – 1985. – Т. 283. - №4. – С. 865 – 869.
6. Лившиц А.С., Гринберг Н.А., Куркумелли Э.Г. Основы легирования наплавленного металла. – М.: Машиностроение, 1969. – 188 с.
7. Полетика И.М., Борисов М.Д., Краев Г.В., Вайсман А.Ф., Голковский М.Г. Особенности формирования структуры и свойств поверхностного слоя стали при облучении пучком релятивистских электронов. // МиТОМ. – 1997. - №4. – С. 13-16.
8. Скорчеллетти В.В. Теоретические основы коррозии металлов. – Ленинград: Химия, 1973. – 264 с.
9. Виноградов В.Н., Колокольников М.Г. Абразивное изнашивание. – М.: Машиностроение, 1990. – 224 с.

## ELECTRON-BEAM SURFACING OF CHROMIUM - CONTAINING COATINGS ONTO THE LOW-CARBON STEEL AT VACUUM FREE CONDITIONS

I.M. Poletika\*, M.G. Golkovski\*\*, M.V. Perovskaya\*, T.A. Krylova\*

\*Institute of Strength Physics and Material Science, Akademicheskoy avenue 2/1, Tomsk, 634021 Russia,  
Phone: +7 3822 286858, Fax: +7 3822 492576, E-mail: [poletika@list.ru](mailto:poletika@list.ru)

\*\*Budker Institute of Nuclear Physics, Academician Lavrentiev avenue 11, Novosibirsk, 630090 Russia;  
E-mail: [golkovsk@inp.nsk.su](mailto:golkovsk@inp.nsk.su)

The experiments with surfacing chromium carbide powder mixtures and chromium carbide onto St3 low-carbon steel in the relativistic electron beam have been carried out. The structure and phase composition of the surface layers have been investigated, the chromium content in them has been determined. The microhardness distribution has been studied, corrosion resistance and abrasive wear have been tested. It has been shown that wear-resistant of the surfaced layers is not only determined by hardness but also by the character of the formed structure. Corrosion resistance depends on the quantity of chromium in the surfaced mixture and increases with increase. We have selected a surfacing mode that allows one to obtain bifunctional coatings having both high wear and corrosional resistance.