УДК 621.791.92

СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКИ НА ВОЗДУХЕ ПОРОШКОВОЙ СМЕСИ Cr_3C_2 И TiC НА НИЗКОУГЛЕРОДИСТУЮ СТАЛЬ

[1]В.Е. Овчаренко, [1]Т.А. Крылова, [1]К.В. Иванов, [2]А.В. Белый

[1]Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт физики прочности и материаловедения
Сибирского отделения Российской академии наук
г. Томск, Российская Федерация
[2]Физико-технический институт НАН Беларуси
г. Минск, Республика Беларусь

Исследовано влияние величины введенной энергии на структуру и фазовый состав покрытий, полученных при наплавке смеси порошков Cr_3C_2 и TiC на Ст3 пучком высокоэнергетических электронов на воздухе. Установлена взаимосвязь между структурно-фазовым состоянием покрытий и распределением микротвердости в них. Показано, что высокая износостойкость в покрытиях с большой объемной долей эвтектики связана с тем, что большинство наличных карбидов титана распределены в аустените с высокой плотностью.

Ключевые слова: вневакуумная электронно-лучевая наплавка, структура, микротвердость, износостойкость, карбиды

STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF COATINGS OBTAINED BY ELECTRON-BEAM CLADDING IN AIR OF Cr_3C_2 AND TiC POWDER MIXTURE ON LOW-CARBON STEEL

[1]V.E. Ovcharenko, [1]T.A. Krylova, [1]K.V. Ivanov, [2]A.V.Byeli

[1]Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian
Branch of Russian Academy of Sciences Tomsk, Russia
[2]Physico-Technical Institute National Academy of Science of Belarus
Minsk, Belarus

The effect of the induced energy on the structure and phase composition of coatings cladded by high energy electron beam in air of Cr_3C_2 and TiC powder mixture on low-carbon steel. The interrelation between structural-phase composition and microhardness

distribution in the coatings.It is shown that the high wear resistance of coatings containing the essential volume fraction of eutectic is related to the distribution of dispersed carbides in austenite.

Keywords: vacuum free electron beam surfacing, structure, microhardness, wear resistance, carbides

E-mail: kta@ispms.ru, ove45@mail.ru, ikv@ispms.ru, vmo@tut.by

1.Введение

Увеличение механических и функциональных свойств материалов являются актуальной задачей, стоящей перед материаловедами, так как, например, улучшение прочностных свойств металлов и сплавов позволяет снижать вес используемых конструкций, рост износостойкости и коррозионной стойкости приводит к увеличению срока эксплуатации деталей и, в конечном итоге, уменьшает себестоимость и повышает рентабельность механизмов и конструкций. Одним из эффективных методов решения данной проблемы является нанесение покрытий на поверхности конструкционных материалов с применением концентрированных источников энергии – токов высокой частоты, лазерного или электронного облучения, потоков высокоэнергетических ионов, плазмы и других [1–4]. Необходимость их применения обусловлена тем, что воздействие может продолжаться короткое время, в течение которого энергия в виде тепла не успевает проникать вглубь изделия, и структурные и фазовые превращения имеют место только в поверхностном слое. Получаемые материалы с модифицированными поверхностными слоями и нанесенными покрытиями имеют улучшенные характеристики твердости, износостойкости, коррозионной стойкости, жаростойкости и другие по сравнению с необработанными материалами, что обеспечивает экономию ресурсов и материальных средств за счет замены дорогостоящих легированных сплавов сплавами, легированными в тонком поверхностном слое.

Перспективным является метод электронно-лучевой обработки, при котором под воздействием электронного луча на поверхности заготовки образуется ванна расплава, в которую вводится наплавочный материал [5,6]. Однако данный метод имеет ряд недостатков такие как, малая глубина проникновения электронов в металлы, сложность введения легирующих элементов и обработки крупногабаритных изделий в вакууме, невозможность расплавления тугоплавких соединений при их использовании в качестве легирующих добавок.

От выше указанных недостатков освобожден метод электронно-лучевой наплавки при использовании пучка релятивистских электронов, выведенного в атмосферу [7–9]. Данный способ обработки дает возможность в широких пределах изменять химический и фазовый состав покрытия за счет использования практически любых тугоплавких соединений. В такой технологии отсутствует вакуумная камера, что снимает ограничение в размерах обрабатываемых деталей.

Наиболее известными легирующими элементами, обеспечивающими повышенную твердость и высокое сопротивление абразивному износу наплавленных покрытий, являются Cr и C в качестве частиц карбида хрома. В работах по вневакуумной электронно-лучевой наплавке порошка карбида хрома на низкоуглеродистую сталь было показано, что в зависимости от режима обработки на поверхности стали формируются слои толщиной 0,8−2,5 мм и твердостью в 1,2–1,8 раза превышающей твердость материала основы [10]. Для увеличения эксплуатационных характеристик наплавленных покрытий было предложено использовать дополнительное легирование карбидом титана, обладающего более высокой твердостью и износостойкостью при более низком значении коэффициента трения [11].

Целью работы явилось изучение влияния добавки карбида титана на структуру, фазовый состав, микротвердость и износостойкость покрытий, полученных методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковой смеси тугоплавких карбидов хрома и титана на низкоуглеродистую сталь.

2. Методика эксперимента

В качестве подложки были использованы пластины размером 100 × 50 × 14 мм из стали Ст3сп (ГОСТ 380-2005). Состав наплавляемой смеси состоял из порошков карбида хрома (Cr_3C_2, 54 масс. %), карбида титана (TiC, 6 масс. %) и фтористого магния (MgF_2, 40 масс. %), все дисперсностью 2–5 мкм. Последний вводили в качестве флюса для защиты от окружающей среды. Наплавочную смесь равномерно распределяли по поверхности металлической подложки и подпрессовывали давлением 30–60 кПа. После подпрессовки плотность насыпки составляла 0,45 г/см^2.

Наплавку осуществляли электронным лучом, выведенным в атмосферу, на ускорителе электронов ЭЛВ-6, разработанном и установленном в Институте ядерной физики СО РАН (г. Новосибирск) [9], в следующем режиме: энергия электронов 1,4 МэВ, ток пучка 25 мА, диаметр пучка 12 мм, расстояние от выпускного отверстия до поверхности 90 мм, ширина развертки 50 мм. Было получено 5 образцов при скоростях перемещения заготовки под пучком 9.5, 8.0, 7.0, 6.0 и 5.5, см/с. Расчетная энергия (*И*), приходящаяся на единицу площади при использованных скоростях сканирования, составляла 7.4, 8.8, 10.0, 11.7 и 12.7 кДж/см^2, соответственно (табл. 1).

Табл. 1

Порядковый номер и режимы обработки образцов

	Режимы обработки				
Номер образца	1	2	3	4	5
W, кДж/см^2	7,4	8,8	10,0	11,7	12,7

Структуру наплавленных покрытий исследовали в поперечном сечении методами оптической и растровой электронной микроскопии на микроскопах Neophot-32 и Quanta 200 3D, соответственно. Металлографические шлифы получали шлифовкой на наждачной бумаге с постепенным уменьшением зернистости с последующей полировкой на алмазной пасте. Заключительную полировку проводили с использованием оксидной суспензии с размером абразива 0,3 мкм. Травление образцов проводили в 4 % растворе азотной кислоты в этиловом спирте при комнатной температуре.

Объемную долю эвтектики в покрытиях определяли линейным методом по методике Розиваля [12]. Микротвердость покрытий и областей подложки, непосредственно прилегающих к ним, измеряли по методу Виккерса на приборе Duramin5 при нагрузке на индентор 0,98 Н в течение 15 секунд. Профили микротвердости по глубине покрытий строили с шагом 0,25 мм, вблизи поверхности раздела «сформированный слой – основа» – 0,125 мм. Для каждого значения глубины делали 10 измерений.

Проводили испытания на абразивный износ о нежестко закрепленные абразивные частицы (с размером частиц не более 1.0 мм), подаваемые в зону трения и прижимаемые к образцу вращающимся резиновым роликом (ГОСТ 23.208-79).

Рентгеноструктурный фазовый анализ производили на дифрактометре ДРОН-6.

Элементный и фазовый состав покрытий изучали методами микрорентгеноспектрального анализа.

3. Результаты эксперимента и их обсуждение

Методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковой смеси карбида хрома и карбида титана были сформированы покрытия на подложке из низкоуглеродистой стали. Исследование поперечных сечений покрытий показало, что в результате облучения при всех исследованных режимах наплавки на стальной подложке образуются сплошные покрытия, свободные от трещин, отслоений, пор и остатков исходной порошковой смеси (рис. 1). После наплавки на поверхности образцов были сформированы слои толщиной 2,2–3,7 мм, в зависимости от режима обработки. С ростом величины введенной энергии толщина покрытия увеличивается.

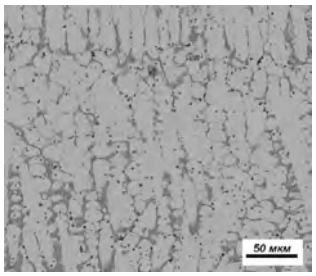
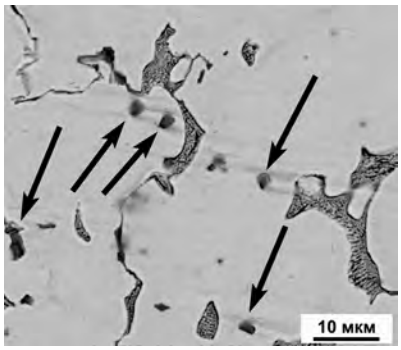


Рис. 1. Металлографическое изображение структуры поперечного сечения покрытия, полученного при плотности введенной энергии пучка W = 8,8 кДж/см^2

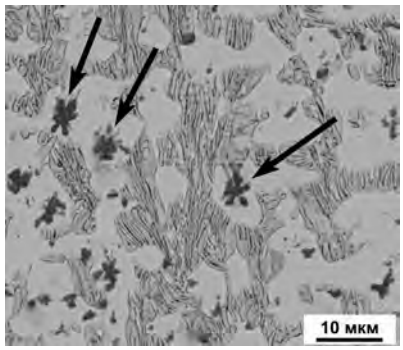
Металлографические исследования показали, что в наплавленных слоях формируется дендритно-ячеистая структура на всех режимах обработки. Структура всех полученных покрытий является доэвтектической, то есть представляет собой смесь фазы твердого раствора и эвтектики (рис. 1).

По данным рентгеноструктурного фазового анализа зерна дендритов и основа эвтектики представляют собой аустенит (γ-железо). Это единственная надежно регистрируемая фаза, других фаз на дифрактограммах не выявлено, вероятно, вследствие их малого количества в покрытиях.

По данным микрорентгеноспектрального анализа, содержание хрома в твердом растворе варьируется от 6 масс. % в покрытиях, полученных при высоких значениях введенной энергии (12,7 кДж/см^2), до 12 масс. % при более низких значениях энергии (8,8 кДж/см^2). Элементный состав эвтектики не зависит от режима обработки, как правило, состоит из углерода, кислорода, титана, хрома и железа. Из сопоставления рентгенофазового анализа, РЭМ-изображения и данных по элементному составу можно сделать вывод, что эвтектика представляет собой смесь фаз твердого раствора хрома в γ-железе и различных карбидов хрома. На рис. 2, *а* контраст, соответствующий темно-серому цвету в области эвтектики, формируется, по-видимому, карбидом хрома $Cr_{23}C_6$, а черные пластинчатые выделения толщиной менее 200 нм принадлежат фазам, обогащенным легким элементом (углеродом) – цементиту или карбидам хрома с высоким содержанием углерода. Особенностью структуры является наличие нерастворившихся частиц карбида титана, большинство из которых имеют характерную форму в виде звезд (рис. 2, *б*).



а



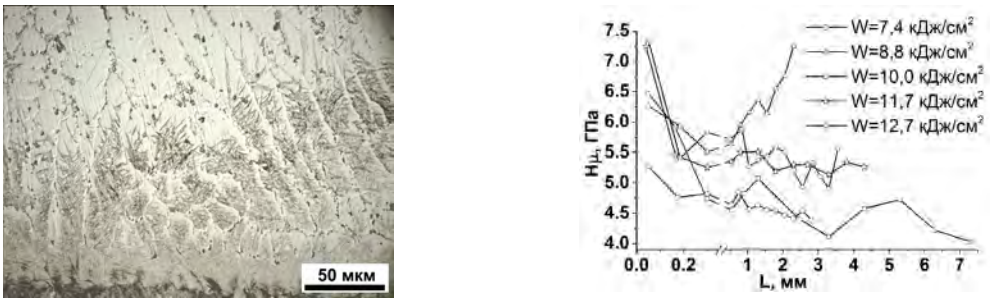
б

Рис. 2. РЭМ-изображение структуры покрытия, полученного при плотности введенной энергии пучка W = 12,7 кДж/см^2 (*а*) и 8,8 кДж/см^2 (*б*). Стрелками показаны нерастворившиеся частицы TiC.

С повышением введенной энергии увеличивается толщина сформированных покрытий, а средняя величина концентрации легирующих элементов в покрытии уменьшается. Так как элементный состав твердого раствора меняется незначительно, а эвтектика по составу остается постоянной, то, снижается объемная доля наиболее легированной части покрытия – эвтектики. Действительно, максимальная объемная доля эвтектики определенная линейным методом по методике Розиваля, достигает 48 % в покрытии, имеющем минимальную толщину, полученном при энергии облучения 8,8 кДж/см^2 (рис. 3)

Рис. 3. Зависимости величины микротвердости вблизи внешней поверхности и объемные доли эвтектики от плотности введенной энергии *W*

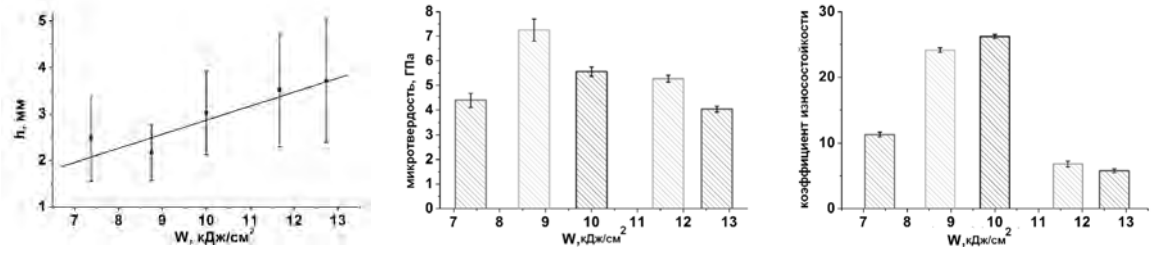
На металлографических снимках видно, что во всех образцах в покрытии вблизи поверхности раздела «покрытие – основа» формируется слой толщиной 100–150 мкм, содержащий мартенсит (рис. 4, *а*). Образование мартенсита, связано с быстрым охлаждением в результате отвода тепла из указанных областей в массивный материал подложки.



а *б*

Рис. 4. Мартенситная структура наплавленного слоя вблизи поверхности раздела «покрытие - основа» при *W* = 8,8 кДж/см^2 (*а*) и распределение микротвердости по толщине наплавленного покрытия (*б*)

Профили распределения микротвердости по толщине наплавленных покрытий представлены на рис. 4, *б*, как видно, во всех случаях максимальное значение микротвердости достигается вблизи поверхности раздела «покрытие – основа», за исключением образца, облученного с плотностью энергии 8,8 кДж/см^2. Структурные исследования показали, что с изменением микротвердости хорошо коррелирует объемная доля эвтектики в покрытии (рис. 3). В областях, свободных от мартенсита, величина микротвердости определяется объемной долей эвтектики.



а *б* *в*

Рис. 5. Зависимости средней толщины наплавленного покрытия (*а*), микротвердости в приповерхностном слое покрытия (*б*) и износостойкость покрытия (*в*) от введенной энергии облучения

На рис. 5, *б* и *в* приведены зависимости микротвердости в приповерхностном слое (на расстоянии 200 мкм) покрытия и износостойкости покрытия от введенной энергии. Видно, что максимальное значение микротвердости наблюдается в покрытии, сформированном при величине введенной энергии (W = 8,8 кДж/см^2). Заметим, что максимальной твердостью в приповерхностном слое обладает покрытие с наименьшей толщиной и наоборот. Отношение максимального к минимальному значению микротвердости (1,8) близко к соответствующему отношению для средних толщин сформированных покрытий. Очевидно, что с увеличением толщины покрытия концентрация легирующих элементов в нем должна падать, так как количество наплавляемого порошка было одно и то же для всех значений энергии. Однако зависимость микротвердости от энергии в интервале энергии 8,8–12,7 кДж/см^2 неудовлетворительно интерполируется линейной зависимостью, что указывает на влияние и других факторов (кроме концентрации легирующих элементов) на величину микротвердости.

Зависимость износостойкости от величины энергии, приведенная на рис. 5, *в*, также нелинейная. Покрытия, сформированные при плотности введенной энергии 8,8 и 10,0 кДж/см^2, имеют близкие значения износостойкости, превышающие значения для остальных значений энергии более чем в 2–4 раза. Такая форма зависимости износостойкости от энергии также указывает на наличие дополнительных факторов. Для установления этих факторов были проведены более подробные исследования структуры и измерение концентрации легирующих элементов в различных фазах, присутствующих в структуре покрытий.

На рис. 6 приведены увеличенные изображения эвтектики в покрытиях, полученных при различных энергиях. Видно, что структура эвтектических фаз существенно отличается. В покрытиях 1 и 2 частиц карбида титана в эвтектиках не наблюдается. При увеличении энергии карбидные частицы в эвтектике хорошо просматриваются в виде дисперсных частиц размером 0.15–0.20 μm. В эвтектике этих покрытий имеется фракция и более грубых частиц TiC размером более 0.5 μm.

Полученные данные хорошо коррелируют с данными ренгеновского микроанализа, приведенными на рис. 7, *в*: покрытиях 1 и 2 содержание титана низкое (отсутствуют следы карбида титана на РЭМ-изображениях). В покрытии 3 концентрация титана вырастает, коррелируя с наличием дисперсных частиц карбида титана в эвтектике. В покрытиях 4 и 5 концентрация титана еще более увеличивается в связи с сохранением дисперсных частиц и возникновением более крупных частиц карбида титана в эвтектике.

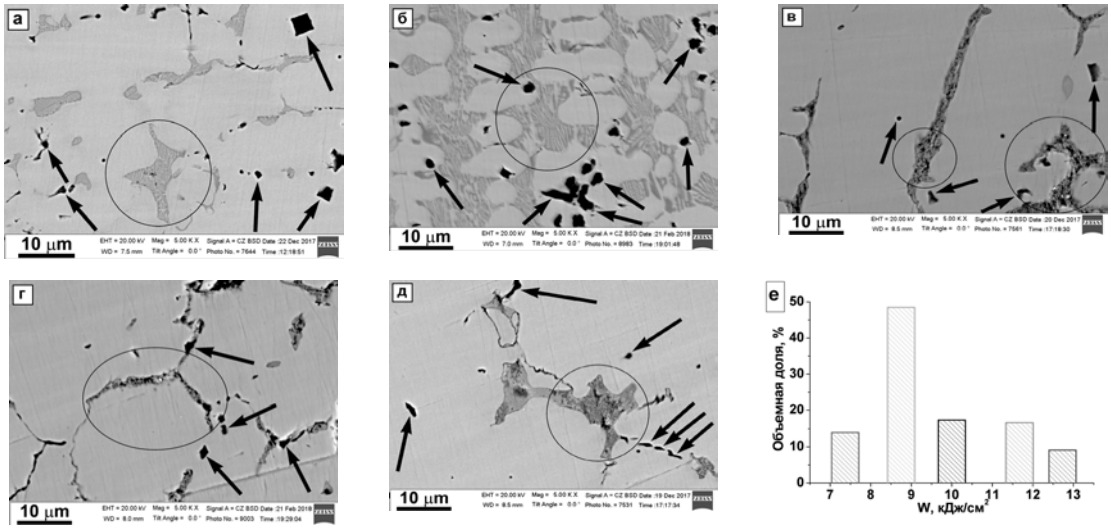
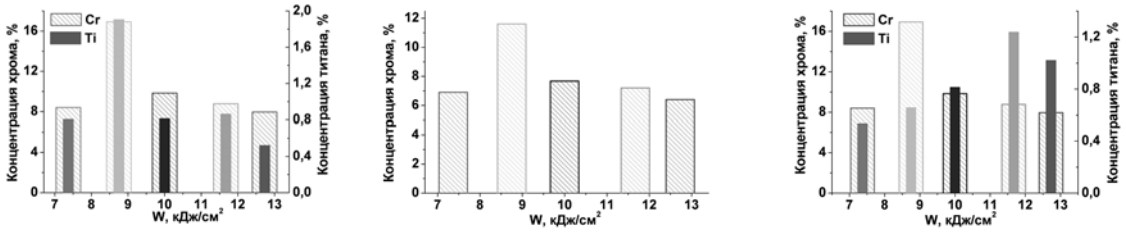


Рис. 6. РЭМ-изображения приповерхностных областей наплавленных слоев с приложенной энергией 7.4 (*а*), 8.8 (*б*), 10.0 (*в*), 11,7 (*г*), 12.7 (*д*) кДж/см^2 и зависимость объемной доли эвтектики от введенной энергии (*е*)



а *б* *в*

Рис. 7. Концентрации хрома и титана в покрытиях, полученных с различной введеной энергией: средняя концентрация в приповерхностном слое (*а*), в зернах аустенита (*б*) и в эвтектике (*в*)

Анализ приведенных результатов показывает, что наиболее резкие отличия структуры покрытия от остальных демонстрирует покрытие 2: в нем в 2 раза вырастает средняя концентрация легирующих элементов в поверхностном слое покрытия, резко увеличивается объемная доля эвтектики, в 1.5–2 раза увеличивается содержание хрома в аустените, значительно увеличивается концентрация хрома в эвтектике. По-видимому, указанные причины и обусловливают максимальное значение величины микротвердости и высокий показатель износостойкости в этом покрытии. Менее очевидна ситуация с максимальным значением износостойкости в покрытии 3. Многие характеристики структуры (такие как среднее содержание легирующих элементов в покрытии, концентрация хрома в аустените, объемная доля эвтектики, наличие в эвтектике дисперсных частиц карбида титана) и уровень микротвердости этого покрытия близки к характеристикам покрытия 4, демонстрирующего почти в 4 раза более низкий коэффициент износостойкости. Различие их состоит лишь в появлении в покрытии 4 фазы карбида титана по границам аустенитных зерен, что неизбежно должно вызвать снижение концентрации дисперсных частиц TiC в эвтектике, так как в среднем концентрация титана в покрытиях не изменяется. Таким образом, можно заключить, что на характеристики микротвердости покрытий, полученных при наплавке порошков карбидов хрома и титана, основное влияние оказывает повышенная объемная доля

эвтектики, в которой к тому же увеличивается содержание хрома, и увеличение концентрации хрома в аустените. На характеристики износостойкости может оказывать влияние размер частиц карбида титана в эвтектике, а именно, дисперсные частицы карбида титана (менее 0,25 мкм) оказывают большее сопротивление износу, чем более крупные.

В литературе имеются данные по структуре, фазовому составу и свойствам покрытий, полученных при наплавлении карбида хрома на низкоуглеродистую сталь высокоэнергетическим электронным лучом вне вакуума. В работе [10] было показано, что при наплавке в интервале внесенных энергий 8,15–9,95 кДж/см^2 формируются покрытия состоящие из зерен твердого раствора хрома в α-железе и перитектики с микротвердостью в 1,2–2,0 раза превышающей твердость основы, т.е. ~3 ГПа [13]. В другой работе показано, что при наплавке с энергией 7,5 кДж/см^2 образуется покрытие, состоящее из зерен твердого раствора хрома в γ-железе и эвтектики с микротвердостью 4,75 ГПа. Сравнение полученных в настоящей работе значений максимальной микротвердости покрытий с приведенными литературными данными показывает, что при внесенной энергии ~7,5 кДж/см^2 влияние титана на твердость покрытия незначительно. Однако при увеличении энергии до 8,7–10,0 кДж/см^2 твердость покрытий с титаном превышает соответствующую величину покрытий без титана в 1,8–2,4 раза. При этом изменяется фазовый состав твердого раствора хрома в железе от ОЦК α-железа к ГЦК γ-железу. Таким образом, даже с учетом того, что большая часть карбида титана при наплавке покрытий не растворилась и осталась в покрытиях в виде исходных частиц карбида, добавка порошка карбида хрома к наплавочной смеси при энергиях 8,8–10,0 кДж/см^2 приводит к изменению фазового состава твердого раствора и к значительному увеличению твердости и износостойкости получаемых покрытий.

4. Выводы

1. Метод вневакуумной электронно-лучевой наплавки на низкоуглеродистую сталь порошковой смеси карбида хрома и карбида титана позволяет сформировать высоколегированные покрытия с толщиной наплавленного слоя 2,2−3,7 мм. В наплавленных покрытиях отсутствуют дефекты в виде трещин и расслоений.

2. Структура всех покрытий является доэвтектической и представляет собой смесь аустенита и эвтектики. Значительная часть карбида титана во всех покрытиях сохраняется в виде крупных частиц.

3. Установлено, что распределение микротвердости в наплавленных покрытиях неоднородно. В большинстве образцов максимум величины микротвердости имеет место вблизи поверхности раздела «покрытие – основа», что связано с образованием в этих областях мартенситной структуры. При наплавке покрытий с величиной внесенной энергии 8,8 кДж/см^2 максимум микротвердости наблюдается в поверхностном слое покрытия, что обусловлено увеличением объемной доли эвтектики.

4. При малых величинах введенной энергии (7,5 кДж/см^2) добавка в наплавочную смесь порошка карбида титана не оказывает существенного влияния на структурно-фазовое состояние и твердость покрытия. При увеличении энергии до 8,8–10,0 кДж/см^2 введение карбида титана изменяет фазовый состав твердого раствора хрома в железе и значительно (в 1,8–2,4 раза) повышает твердость и износостойкость покрытий.

5. Высокая износостойкость в покрытиях с большой объемной долей эвтектики связана с тем, что большинство наличных карбидов титана (наиболее износостойкая фаза) распределены в аустените с высокой плотностью. Наибольшая износостойкость в группе покрытий с относительно малой долей эвтектики наблюдается в образцах, в которых карбид титана, не находящийся в аустените, распределен только в эвтектике (не располагается между границ зерен аустенита) в виде дисперсных частиц.

6. Наилучшую комбинацию механических свойств и износостойкости демонстрирует покрытие, полученное при средних значениях введенной энергии. Для получения покрытий с заданным сочетанием свойств необходимо учитывать все факторы структуры, определяющие искомые свойства.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы (Проект N°23.2.1). Структурные исследования методом растровой электронной микроскопии проведены на оборудовании Томского материаловедческого центра коллективного пользования Национального исследовательского Томского государственного университета.

Авторы выражают благодарность Голковскому Михаилу Гедальевичу (Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН) за оказанную помощь в проведении электронно-лучевой наплавки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ткачев, В. Н. Индукционная наплавка твердых сплавов / В. Н. Ткачев [и др.]; под общ. ред. В. Н. Ткачева. М.: Машиностроение, 1970. — 183 с.
2. Соснин, Н.А. Плазменные технологии. Сварка, нанесение покрытий, упрочнение / Н.А. Соснин, С.А. Ермаков, П.А. Тополянский. – М.: Машиностроение, 2008. – 406 с.
3. Рябцев, И.А. Наплавка деталей машин и механизмов / И.А. Рябцев. – Киев: Екотехнологія, 2007. – 160 с.
4. Повышение износостойкости стали наплавкой / Е.В. Капралов [и др.] // Сталь. 2014. N°7. С. 86 – 88.
5. Электронно-лучевая наплавка в вакууме: оборудование, технология, свойства покрытий /В.Е. Панин [и др.] // Сварочное производство. – 2000. – N°2 – С. 34–38.
6. Электронно-лучевая наплавка в черной металлургии / С.И. Белюк [и др.] // Физическая мезомеханика. – 2006. – Т. 9. – N° S1 – С. 157–160.
7. Фоминский, Л.П. Наплавка порошковых покрытий пучком релятивистских электронов / Л.П. Фоминский, В.В. Казанский // Сварочное производство, – 1985. – N°5 – С. 13–15.
8. Основы легирования стали в пучке релятивистских электронов / И.М. Полетика [и др.] // Известия ВУЗов, Физика. – 1996. – N°3 – С. 115 – 125.
9. Structure of surface layers produced by non-vacuum electron beam boriding / I.A. Bataev [et al.] // Applied Surface Science, 2013, Vol. 284, P. 472–481
10. Структура и свойства коррозионно-стойких покрытий, полученных методом электронно-лучевой наплавки в атмосфере воздуха / И.М. Полетика [и др.]. – МиТОМ. – 2009. – N°12. – С. 33–39.
11. Структура и свойства стали после вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошков титана, тантала, молибдена и графита / Д.О. Муль [и др.] // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2013. – N°3 (60). – С. 115 – 120
12. Салтыков, С.А. Стереометрическая металлография / С.А. Салтыков. – М.: Мееталлургия, 1970. – 376 с
13. Создание бифункциональных покрытий методом электронно-лучевой наплавки / И.М. Полетика [и др.] // Перспективные материалы. – 2007, N°1. – С. 78–85.

REFERENCES

1. Tkachev V.N. Indukzionnaya naplavka tverdix splavov [Induction hardfacing of hard alloys]/ edit V.N. Tkachev. Moscow, Mashinostroenie,1970. 183 p. (in Russian)
2. Sosnin N.A., Ermakov S.A. Topolyanskii P.A. Plazmennie texnalogii. Svarka, nanesenie pokhitii, uprochnenie [Plasma technologies. Welding, coating, hardening]. Moscow, Mashinostroenie, 2008. 406 p. (in Russian)
3. Ryabcov I.A. Naplavka detelei macshin i mexanizmov [Surfacing of machine parts and mechanisms]. Kiev: Ekotexnologiya, 2007. 160 p. (in Russian)
4. Kapralov E.V., Raikov S.V., Butovskii E.A., Gromov V.E., Kosterev V.B. Povicshenie iznosostoikosti stali naplavkoi [Increased wear resistance of steel by surfacing] // Stal. 2014. No.2, pp. 86–88. (in Russian)
5. Panin V.E., Belyuk S.I., Durakov V.G., Pribytkov G.A., Rempe N.G. Electronno-luchevaya naplavka v vacuume: oborudovanie, tekhnologiya, svoystva pokrytiy [Electron beam cladding in vacuum: equipment, technology, cladding properties]. Svarochnoe proizvodstvo [Welding production], 2000, No.2, pp. 34–38. (In Russian).
6. Belyuk S.I., Samartsev V.P., Galchenko N.K., Dampilon B.V., Raskoshny S.Yu., Kolesnikova K.A. Electronno-luchevaya naplavca v chernoy metallurgii [Electron beam cladding in ferrous metallurgy]. Fizicheskaya mezomekhanika [Physical mesomechanics], 2006, Vol. 9, No. S1, pp. 157–160. (In Russian).
7. Fominsky L.P., Kazansky V.V. Naplavka poroshkovykh pokrytiy puchkom relyativistscikh electronov [Cladding of powder coatings by the beam of relativistic electrons]. Svarochnoe proizvodstvo [Welding production], 1985, No. 5, pp. 13–15. (In Russian).

8. Poletika I.M., Borisov M.D., Kraev G.V., Vaisman A.F., Golkovskii M.G., Durakov V.A. Osnovy legirovaniya stali v puchke relyativistskih ehlektronov [Principles of the alloying of steel in a beam of relativistic electrons] // Russian Physics Journal. 1996. Volume 39, Issue 3. pp 275–283. (in Russian)
9. Bataev I.A., Bataev A.A., Golkovski M.G., Krivizhenko D.S., Losinskaya A.A., Lenivtseva O.G. Structure of surface layers produced by non-vacuum electron beam boriding, Applied Surface Science, 2013, Vol. 284, P. 472–481
10. Poletika I.M., Ivanov Yu.F., Golkovsky M.G., Krylova T.A., Perovskaya M.V. Structura i svoistva corrosionno-stoykikh pokrytiy, poluchennykh metodom electronno-luchevoy naplavki v atmosfere vozdukha [Structure and properties of corrosion-resistant surfacings obtained by electron beam cladding in air]. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov [Metal Science and Heat Treatment of Metals], 2009, No. 12, pp. 33–39. (In Russ.).
11. Mul D.O., Drobyaz E.A., Chakin I.K., Samoilenko V.V., Lozhkin V.S., Dostavalov R.A. Structura i svoistva stali posle vnevacuumnoy electronno-luchevoy naplavki poroshkov titana, tantala, molibdena i grafita [Structure and properties of steel subjected to electron beam cladding of titanium, tantalum molybdenum and graphite powders in air]. Obrabotka metallov: tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty [Treatment of metals (technology, equipment, tools)], 2013, No. 3 (60), pp. 115–120. (In Russ.).
12. Saltykov S.A. Stereometricheskaya metallografiya [Stereometric metallography]. Moscow: Metallurgiya, 1970. 376 p. (in Russian)
13. Poletika I.M., Golkovsky M.G., Perovskaya M.V., Krylova T.A., Salimov R.A., Gnyusov S.F., Galchenko N.K. Sozdanie bifunktsionalnykh pocrytiy metodom electronno-luchevoy naplavki [Formation of bifunctional coatings by electron beam cladding]. Perspektivnye materialy [Advanced materials], 2007, No. 1, pp. 78–85. (in Russian)

Статья поступила в редакцию в окончательном варианте 22.06.18