

ФОРМИРОВАНИЕ ЭВТЕКТИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ ВЫСОКОСКОРОСТНЫМ ПЛАВЛЕНИЕМ

С. В. Литовченко, В. М. Береснев, В. А. Чишкала, И. А. Манучарян

Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,

г. Харьков, Украина

Поступила в редакцию 28. 03. 2014

Рассмотрена возможность создания твердых функциональных покрытий на стали и молибдене путем высокоскоростного оплавления многоэлементных эвтектических композиций. Экспериментально получены образцы металлов с композиционными покрытиями. Исследовано влияние условий оплавления на структуру покрытий.

Ключевые слова: покрытия, эвтектика, структурно-фазовые превращения, оплавление, микроструктура.

ФОРМУВАННЯ ЕВТЕКТИЧНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ ВИСОКОШВИДКІСНИМ ПЛАВЛЕННЯМ

С. В. Литовченко, В. М. Береснев, В. О. Чишкала, Й. А. Манучарян

Розглянуто можливість створення твердих функціональних покриттів на сталі та молибдені шляхом високошвидкісного оплавлення багатоелементних евтектичних композицій. Експериментально отримані зразки металів з композиційними покриттями. Досліджено вплив умов оплавлення на структуру покриттів.

Ключові слова: покриття, евтектика, структурно-фазові перетворення, оплавлення, мікроструктура.

FORMATION OF EUTECTIC COMPOSITE COATINGS BY HIGH-SPEED MELTING

S. V. Lytovchenko, V. M. Beresnev, V. O. Chyshkala, I. A. Manucharian

The ability to create a hard functional coatings on steel and molybdenum by high-speed melting of multielement eutectic composition was examined in the article. Samples of metal composite coatings were obtained experimentally. Influence of melting conditions on the structure of the coatings was investigated.

Keywords: coatings, eutectic, structural phase transformations, melting, microstructure.

ВЕДЕНИЕ

Научно-технический прогресс, являющийся уже неотъемлемой и во многом определяющей составляющей общественного развития, неразрывно связан с совершенствованием современного высокотехнологичного промышленного производства. В свою очередь такое производство невозможно без применения конструкционных и функциональных материалов, способных длительно поддерживать требуемый уровень эксплуатационных свойств в условиях комплексного воздействия ряда разрушительных внешних факторов — механических, термических

или радиационных нагрузок, коррозии, трения, эрозии и других [1].

Совершенствование свойств материалов является необходимым условием успешного развития любой отрасли техники.

Важной составляющей при разработке новых материалов для применения в современных технологиях является исследование фундаментальных принципов строения твердых тел, механизмов осуществления структурно-фазовых превращений в них, основных закономерностей образования связей в цепочке «состав — структура — свойства».

Одним из направлений работ по управлению свойствами материалов является модифицирование их поверхности формированием различных функциональных слоев, обеспечивающих повышение эксплуатационных характеристик изделий.

Функциональные покрытия позволяют значительно повысить надежность оборудования, снизить стоимость обслуживания, продлить ресурс эксплуатации, восстановить рабочие поверхности и детали, защитить от высоких нагрузок и агрессивных сред [2].

Широкое внедрение покрытий сдерживается тем, что многие узлы и детали современного оборудования работают при воздействии нагрузок, значения которых близки или даже превосходят предельно допустимые для данных покрытий. Для расширения границ применения покрытий необходимо значительное улучшение их свойств, при этом следует предотвращать реализацию «обратных связей», когда повышение уровня одних характеристик вызывает падение уровня других.

Практика показывает, что приемлемым вариантом защиты от многофакторного внешнего разрушающего воздействия является использование многофазных и многоэлементных покрытий, часто представляющих собой самостоятельную композиционную единицу [3, 4]. Введение в состав покрытия дополнительных ингредиентов или замена одних составляющих другими позволяют в достаточно широких пределах варьировать его отдельные свойства без существенного изменения общей функциональности материала. Такой подход соответствует современным требованиям критического отношения к универсальности материалов и усилению специализированных технических решений, узко направленных на достижение отдельного конкретного результата.

ПРИМЕНЕНИЕ ПОКРЫТИЙ ЭВТЕКТИЧЕСКОГО ТИПА ДЛЯ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Среди тугоплавких материалов особый интерес для формирования износостойких,

коррозионностойких и термоустойчивых функциональных покрытий представляют литые твердые сплавы эвтектического типа, характеризующиеся максимальной прочностью при эвтектическом составе. Улучшение структуры и свойств покрытий достигается созданием в них гетерогенной дисперсно-упорядоченной или более однородной аморфно-кристаллической структур.

Эвтектические покрытия с заданной структурой обеспечивают повышение термостабильности систем металл — покрытие вследствие того, что равновесные эвтектические композиции, особенно направленно закристаллизованные, обладают стабильностью свойств практически до температуры $0,9 T_{\text{пл}}$ эвтектики [5].

Химико-термическая обработка (ХТО) является одной из наиболее распространенных технологий формирования функциональных покрытий. Преимуществами этого метода являются высокая технологичность, доступность, сравнительная экономичность, большое разнообразие составов покрытий. В то же время ХТО зачастую достаточно высокотемпературна, длительна и энергозатратна. Кроме того, продолжительное термическое воздействие может приводить к заметному изменению механических свойств подложки, вызванному рекристаллизационными и диффузионными процессами.

Указанные недостатки в определенной мере могут быть преодолены использованием составов, образующих относительно легкоплавкие эвтектики. Интенсификация процесса формирования покрытия достигается за счет увеличения скорости диффузии насыщающих элементов в жидкой эвтектической прослойке, которая образуется в зоне контакта компонентов насыщающей смеси с поверхностью защищаемого материала. Формированию и исследованию разнообразных покрытий эвтектического состава посвящено достаточно много работ [6, 7]. Одними из активно исследуемых являются многокомпонентные кремнийсодержащие покрытия состава Ni-Cr-Si-B [8, 9], иногда с твердыми добавками [10].

Для создания функциональных покрытий на металлах перспективным вариантом

ХТО является осуществление контактного эвтектического плавления, единственным условием реализации которого между двумя веществами является наличие диаграммы состояния эвтектического типа. Важным преимуществом указанного способа является его достаточно простая локализуемость, т. е. возможность нанесения покрытия на отдельных строго заданных участках поверхности.

По многим параметрам самой простой для реализации является технология, по которой для создания поверхностного эвтектического слоя необходимый состав наносится на поверхность в виде порошка, шликера или обмазки, а затем расплавляется непосредственно на поверхности детали при последующем нагреве (косвенном — в печах или прямом — при пропускании тока промышленной или высокой частоты).

В состав обмазок (шликера), как правило, входят источники атомов диффундирующих элементов, а также специальные добавки, температура плавления которых значительно выше температуры образования эвтектики.

Другим вариантом нанесения эвтектического покрытия является процесс, включающий предварительное приготовление порошка эвтектического сплава и его последующее нанесение на поверхность изделия плазменным методом. Следует учитывать, что при реализации такого способа полученное покрытие по фазовому составу и структуре будет заметно отличаться от аналогичного эвтектического слоя, полученного при расплавлении порошковой смеси или шликерной обмазки непосредственно на металлическом изделии.

Это различие обусловлено свойствами компонентов и процессами взаимодействия в системе «эвтектический порошковый сплав — металлическая подложка» для одного случая и диффузионными процессами, приводящими к формированию эвтектического покрытия с хорошей адгезией к металлической основе в другом случае. Кроме того, операции предварительного приготовления эвтектического порошкового сплава усложняют процесс, делают его более длительным и дорогим.

Кроме описанных, достаточно распространенными методами формирования эвтектических покрытий являются: плазменное или газопламенное напыление с последующим оплавлением; электродуговая наплавка расходуемым электродом; лазерное или электронно-лучевое оплавление; оплавление токами высокой частоты; оплавление покрытий в вакуумных печах.

Все известные методы нанесения и оплавления покрытий нельзя признать универсальными, каждый из них имеет как достоинства, так и недостатки, которые должны учитываться при выборе оптимального технологического процесса получения покрытия с требуемым комплексом свойств.

Говоря о свойствах эвтектических покрытий, необходимо отметить, что наличие в структуре покрытия незначительного количества эвтектики существенно снижает хрупкость защитного слоя и в ряде случаев приводит к повышению его износостойкости [11].

Таким образом, наличие в структуре покрытия, особенно — упрочняющего поверхность, прослойки с эвтектической составляющей создает предпосылки для разработки различных по составу и микроструктуре функциональных слоев с повышенными характеристиками, в первую очередь — механическими и противокоррозионными.

Несмотря на очевидное преимущество использования эвтектических покрытий для повышения функциональных возможностей деталей и механизмов в условиях коррозии или абразивного износа, в литературе нет достаточных данных о разработанных технологиях нанесения и оплавления таких покрытий.

ПОЛУЧЕНИЕ ОБРАЗЦОВ

В данной работе исследована возможность получения твердых кремнийсодержащих композитных покрытий на различных металлах путем высокоскоростного контактного эвтектического плавления, а также влияния условий плавления на микроструктуру покрытий.

В качестве основы композитных металлокерамических покрытий был выбран

основной состав, содержащий никель, бор, кремний, иногда с добавлением хрома. Эвтектические сплавы такого или близкого состава, часто построенные на эвтектиках никель-бор [12], кремний-никель [13] или кремний-никель-бор [14] достаточно распространены, материалы на их основе или с их использованием исследовались ранее [15, 16], в том числе и авторами данной работы [17, 18], интерес к ним сохраняется и сегодня [19]. В качестве дополнительных армирующих добавок использовались порошки твердого сплава и дисилицида молибдена.

Основой полученных покрытий была эвтектика в системе никель-бор (температура плавления эвтектики Ni-Ni₃B составляет 1091 °С), а добавки кремния и хрома в первую очередь обеспечивали снижение температуры плавления состава. Так, трехкомпонентная фаза в системе Ni-Si-B образуется по эвтектической реакции уже при 1025 °С [15], а легирование компонентов шликера углеродом и железом из стальной подложки при высокотемпературном оплавлении приводит к дальнейшему снижению температуры, при которой образуется жидкая фаза. Точное определение температуры плавления покрытия затруднено в первую очередь непостоянством его состава, который зависит от конкретной подложки, а также особенностями реализации условий плавления и кристаллизации, которые могут заметно отличаться от равновесных.

Для формирования покрытий был применен достаточно традиционный шликерный метод предварительного нанесения подготовленного состава на обрабатываемую поверхность с последующим быстрым нагреванием до образования жидкой эвтектической фазы и быстрым же охлаждением расплава.

Необходимо отметить, что шликерный метод, с одной стороны, отличается простотой осуществления и доступностью, а, с другой стороны, является, вероятно, одной из основных причин нестабильности покрытия в условиях длительной высокотемпературной эксплуатации и высоких механических нагрузок. Кроме того, возможные фазовые превращения, создающие фазовый наклеп

в матричной компоненте, затрудняют создание высококачественных покрытий.

Исходными материалами для шликера являлись: электролитический никель ПНЭ-1 (чистотой 99,9 %); кремний поликристаллический марки КПС-3 (99,9 %), аморфный бор (99,8 %), хром электролитический чешуйчатый ЭРХ-1 (99,9 %). При необходимости ингредиенты дополнительно измельчались в вибромельнице, после чего для дальнейшего использования отсеивали фракцию дисперсностью 10—20 мкм. Исходные подготовленные порошки, взятые в количестве, необходимым для получения требуемого состава, смешивались во вращающемся барабане.

Кроме названных материалов использовали готовые промышленные порошки марки ПГ-СР4 состава Ni - 16,5Cr - 3,7Si - 3B - 0,8C.

В качестве армирующих добавок применяли порошки твердого сплава ВК-6 дисперсностью 20—500 мкм, получаемых из спеченных изделий измельчением в вибромельнице, и порошки промышленно выпускаемого (ТУ6-09-03-396-74) порошка дисилицида молибдена дисперсностью 40—60 мкм.

Шликерные композиции получали смешиванием порошковых компонентов с 0,5 % водным раствором карбометилцеллюлозы.

В качестве материала подложки использовалась листовая нержавеющая сталь марки Х18Н10Т (габаритные размеры образцов 40 × 20 × 1,5 мм³) и фольга молибдена марки МЧ (40 × 20 × 0,2 мм³). Плоская зона нанесения шликерного покрытия в средней части образцов имела размеры 15 × 15 мм².

Нанесение шликера осуществлялось окрашиванием с последующим высушиванием. При необходимости окрашивании осуществляли в несколько этапов для достижения общей толщины высушенного слоя шликера от 0,5 до 2 мм.

Оплавление покрытия осуществляли двумя разными способами. Первый из них — оплавление в вакууме лучше 10⁻⁴ тор в рабочей камере модернизированной установки СШВЭ-1.2,5/25И2. Образцы крепили в водоохлаждаемых токоподводах и нагревали прямым пропусканием тока до оплавления покрытия. Температуру высокотемпературной

зоны контролировали вольфрам-рениевой термопарой ВР5/20. Появление расплава фиксировали визуально через смотровое окно в верхней крышке вакуумной камеры. Стандартный вариант термического воздействия включал нагревание до плавления (~10 с), выдержку при появлении жидкой фазы (2—4 с) и охлаждение до комнатных температур (~30 с).

По второму методу оплавление покрытия осуществляли на стенде электроискровой контактной сварки путем ультракоротковременного электроимпульсного нагрева на воздухе. При такой обработке жидкая фаза в покрытии присутствует в течение десятых долей секунды. Размер оплавляемой зоны ограничен размерами контактной поверхности электродов, которые имели диаметр 5 мм.

После оплавления получали образцы с композиционными эвтектическими покрытиями.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ОБРАЗЦОВ

Структура кремнийсодержащих эвтектических покрытий, обеспечивающая их основные физико-механические характеристики, является важнейшим фактором, определяющим возможность и целесообразность их использования для эксплуатации в готовых изделиях в условиях тех или иных разрушающих нагрузок [20, 21]. Именно поэтому экспериментальные исследования структуры и ее зависимости от технологических параметров формирования покрытий актуальны и имеют важное практическое значение.

Для изучения структуры полученных материалов с композиционными эвтектическими покрытиями использовали электронный микроскоп JSM-7001F с термоэмиссионным катодом и энерго-дисперсионным спектрометром рентгеновского излучения, а также металлографический микроскоп МИМ-8. Из механических характеристик определяли микротвердость H_{μ} и твердость по Виккерсу HV.

Исследования показали, что структура покрытия мало зависит от материала использованных подложек (стали и молибдена) и определяется составом шликера и параметрами

термического воздействия для оплавления. Некоторые различия наблюдались в пограничных зонах контакта подложки с покрытием. Эти различия в большей степени связаны с разными электрофизическими и тепловыми свойствами подложек — электросопротивлением, теплопроводностью, теплоемкостью, смачиваемостью, и в меньшей — с образованием различных химических соединений в приграничном слое.

При нагревании образца молибдена с трехэлементным покрытием состава Ni-5B-5Si (вес. %) уже до температуры около 800 °С активизируется экзотермическая реакция образования силицидов и боридов никеля, протекание которой фиксировали визуально. Возникающие в системе покрытие — подложка механические напряжения приводят к растрескиванию шликерного слоя, а следствием экзотермической реакции является дополнительное локальное повышение температуры, приводящее к образованию жидкой эвтектической фазы сначала в наиболее горячих участках вблизи границы подложки со шликером (рис. 1). Жидкость легко просачивается по дефектам шликерного слоя на его поверхность, где при остывании кристаллизуется.

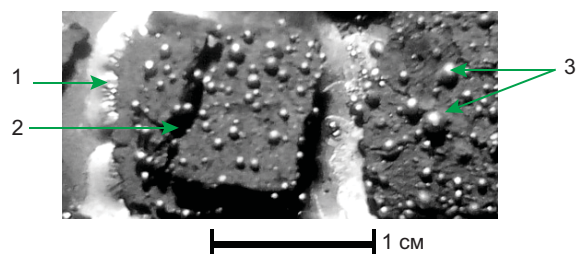


Рис. 1. Неполное оплавление покрытия состава Ni-5B-5Si (вес. %):

- 1 — слой расплава на границе молибдена и шликера;
- 2 — трещины в шликерном слое;
- 3 — сфероидные капли затвердевшей эвтектики

Металлографический и рентгеновский анализы показали, что основой покрытия является эвтектическая смесь состава 96,36 % Ni + 3,64 % В (вес. %), образующаяся между никелем и его низшим боридом Ni_3B . Поскольку бор выступает активным восстановителем оксидов, которые могут присутствовать в покрытии как технологические примеси, его некоторый избыток в исходном порошке по отношению к эвтектическому составу вполне

корректен и даже необходим. Эвтектика Ni-Ni₃B обеспечивает хорошее растекание расплава и смачивание поверхности подложки (см. рис. 1, элемент 1), что предопределяет высокую адгезию покрытия. Поверхность нерасплавленного шликера, напротив, смачивается значительно хуже (краевой угол смачивания больше 110°), и при кристаллизации эвтектики после плавления до этой стадии (после нагрева в течение 3—4 с) она собирается на поверхности в виде отдельных сфероидных капель.

При температурах 1020—1040 °С происходит быстрое расплавление шликерного покрытия, при кристаллизации которого формируется традиционная дендритная структура (рис. 2).

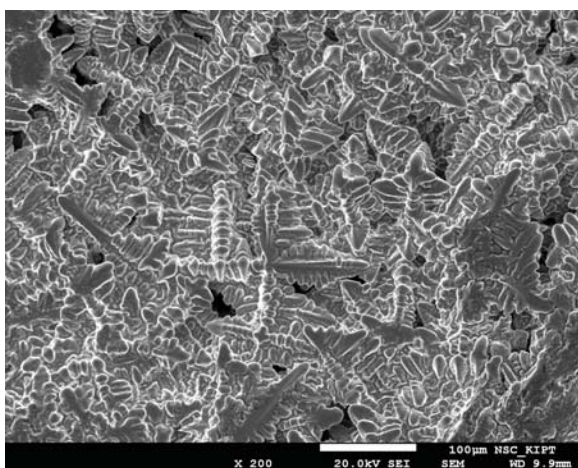


Рис. 2. Микроструктура покрытия Ni-Si-B, оплавленного при 1020—1040 °С

Элементы дендритов формируются послойно с толщиной прослоек роста от 50 до 300 нм (рис. 3).

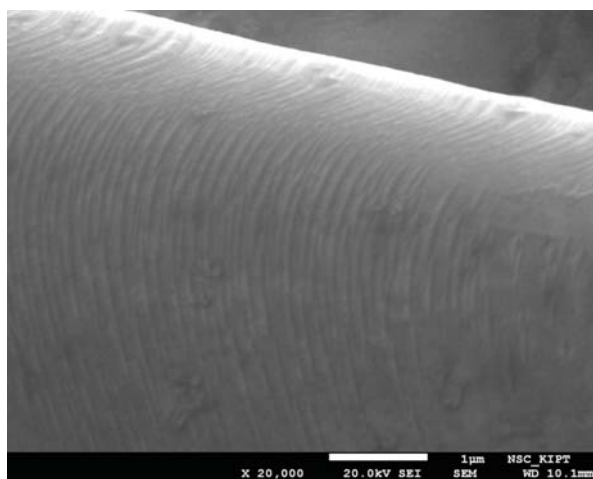


Рис. 3. Нанометрические прослойки дендритных кристаллов в покрытии Ni-Si-B

Необходимо отметить, что полученное покрытие достаточно компактно, его пористость незначительна, по нашим оценкам не превышает 2 %.

На текучесть покрытия существенно влияет форма кривой ликвидуса эвтектики никель-бор. У доэвтектических составов линия ликвидуса при уменьшении содержания бора в составе достаточно круто поднимается вверх, температура плавления состава повышается (приблизительно на 100 °С на потерю каждого массового процента бора), поэтому достаточно небольшие колебания температуры при плавлении шликерного покрытия относительно слабо изменяют соотношение твердой и жидкой фаз, что практически не сказывается на подвижности покрытия. У заэвтектических составов, где диаграмма имеет пологую линию ликвидуса (прирост температуры около 25 °С при увеличении количества бора на 1 %), даже незначительный перегрев сопровождается резким ростом объема жидкой фазы и, соответственно, подвижности расплава.

Добавки кремния в систему никель — бор приводят к некоторому снижению температуры эвтектики, представленной сложным набором силикоборидов никеля и двойных фаз [22].

Быстрое охлаждения оплавленного металлокерамического покрытия приводит к существенной концентрации внутренних напряжений в покрытии, релаксация которых инициирует растрескивание крупных кристаллитов пластинчатых боридов при нагрузках ниже предела текучести матрицы, что обычно свойственно литым материалам.

В зависимости от условий охлаждения микротвердость (при нагрузке на индентор 50 г) твердого раствора на основе никеля составляет 400—450 кг/мм², в случае чистой эвтектики микротвердость твердого раствора бора в никеле составляет ~190 кг/мм², а сложных эвтектик на основе никеля — 1100—1500 кгс/мм². Твердость по Виккерсу тройной эвтектики Ni-Si-B близка к значению 900 кгс/мм².

В процессе создания покрытия естественным образом сформировались промежуточные слои — твердые растворы, снижающие

градиент свойств и напряжения между покрытием и основой. Установлено, что бор, обладающий малым ионным радиусом, быстро диффундирует в подложку и уплотняет ее. При этом существенно растет хрупкость покрытия. Добавки хрома и кремния ослабляют такое негативное влияние бора.

Оплавление шликеров на основе промышленного порошка ПГ-СР4 (Ni-Cr-Si-B) и порошка твердого сплава ВК-6 (до 50 вес. % в составе порошка шликера) происходит при несколько большей температуре. В начальной стадии оплавления (рис. 4) в структуре присутствуют кристаллы измельченного твердого сплава и оплавленного эвтектического сплава. Данную стадию можно рассматривать как некоторое сочетание процессов плавления и спекания, приводящее к образованию первичных механических контактов между составляющими композит веществами. В местах контакта эвтектической матрицы композита с армирующими частицами твердого сплава наблюдается хорошее смачивание и взаимодействие.

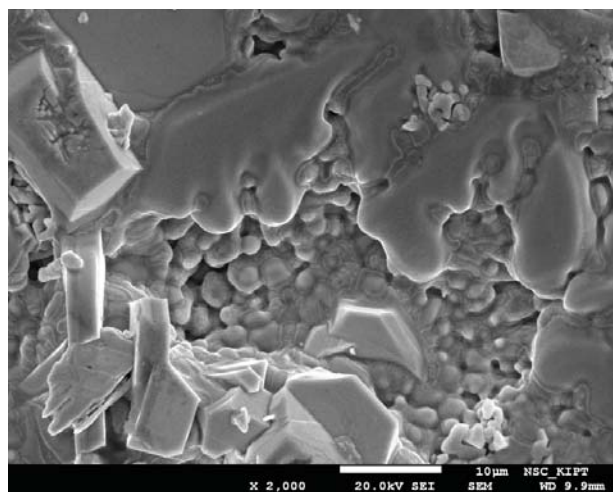


Рис. 4. Начальная стадия оплавления покрытия Ni-Cr-Si-B с добавками твердого сплава (температура 1050 °С)

Для полного оплавления композитного шликера ПГ-СР4/ВК-6 (Ni-Cr-Si-B/WC-Co) необходима температура около 1080 °С. Определенной структурной особенностью поверхности покрытия является наличие на ней островковых участков боросиликатного стекла с размерами от десятков до сотен микрометров (рис. 5). Твердость чистой эвтектики Ni-Cr-Si-B составляет 800—900 кгс/мм²,

а твердых дисперсных включений в ней 1100—1200 кгс/мм².

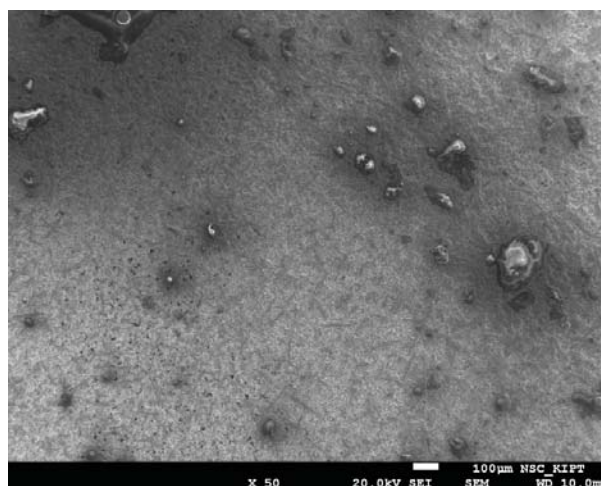
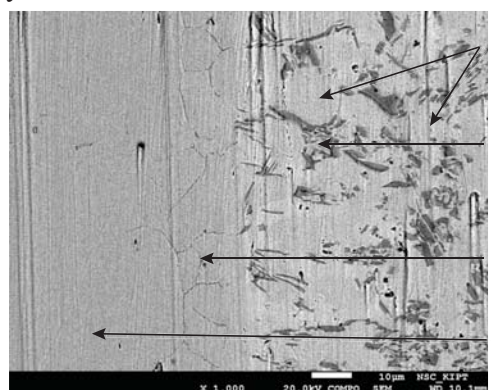
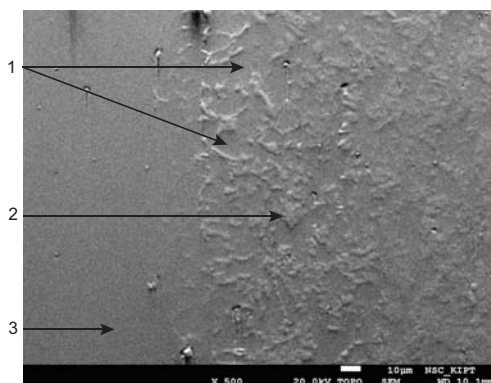


Рис. 5. Поверхность оплавленного при 1080 °С покрытия из порошков ПГ-СР4 и твердого сплава ВК-6

Исследования микроструктуры покрытия на стали (рис. 6) выявили наличие в нем отдельных продолговатых пор, расположенных, в основном, вокруг твердосплавных армирующих включений.



а



б

Рис. 6. Микроструктура образца с покрытием из порошков ПГ-СР4 и твердого сплава ВК-6: *а* — композиционный контраст; *б* — топографический контраст, 1 — включения частиц твердого сплава в покрытие, 2 — эвтектика в покрытии, 3 — сегрегация боридов в приграничном слое основы, 4 — основа

В основу по границам зерен на глубину до 20 мкм диффундирует бор, при этом образования заметного количества промежуточных хрупких боридных фаз железа на границе основы и покрытия не обнаружено. Отсутствие их объясняется малой продолжительностью существования расплава. Таким образом можно предположить, что охрупчивание образцов с покрытиями при оплавлении в течении 2—4 с не происходит.

Шликерное покрытие состава Ni-Cr-Si-B/WC-Co на стали было оплавлено также электроимпульсным нагреванием на воздухе. При таком способе длительность максимального термического воздействия на объект сокращается до десятых долей секунды, за счет чего существенного окисления материалов не происходит.

В покрытии присутствует эвтектика с твердосплавными включениями (рис. 7).

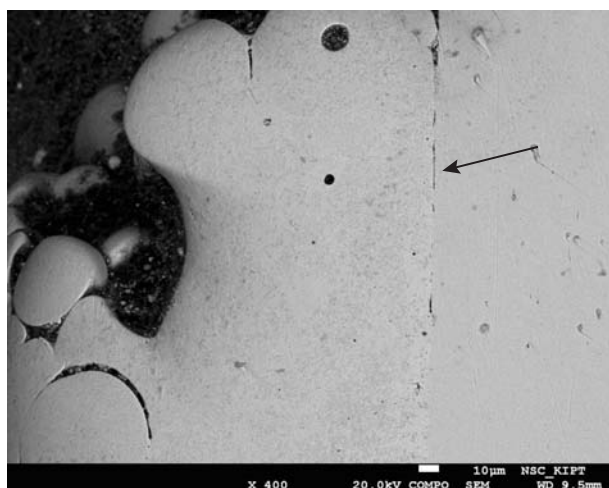


Рис. 7. Поперечный шлиф периферийного участка покрытия ПГ-СР4/ВК-6, оплавленного электроимпульсным воздействием

На периферийных участках плавленной зоны заметна граница раздела покрытия и основы (указана стрелкой на рис. 7), выявляемая на изображениях с композиционным контрастом вследствие вероятной сегрегации бора. В центральной части образца температура выше, температурное поле более однородно. Покрытие сформировано многоэлементной эвтектикой с включениями зерен твердого сплава, размер которых может достигать 40 мкм (рис. 8). На поперечных шлифах выделения бора по границам зерен и видимые признаки диффузии бора в основу

не зафиксированы, что подтверждает предпочтительность быстротечных (0,1 с) процессов теплового воздействия при формировании композитных кремнийсодержащих покрытий на основе Ni-Cr-Si-B с твердыми добавками.

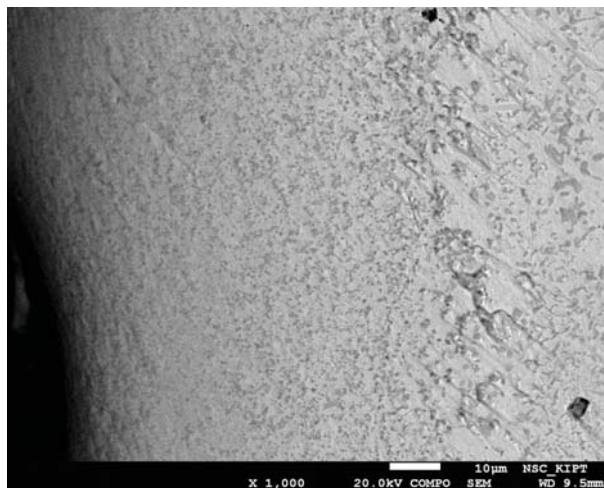


Рис. 8. Поверхность покрытия, оплавленного электроимпульсным воздействием

Введение дисилицида молибдена (до 30 %) в качестве твердой добавки в трехкомпонентный состав никеля, кремния и бора позволило улучшить качество покрытия (рис. 9): снизить пористость, улучшить компактность и сплошность границы с основой (и для стали, и для молибдена в качестве подложек).

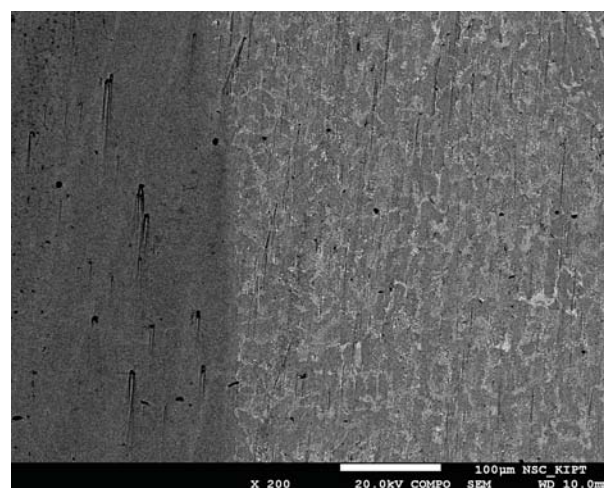


Рис. 9. Структура оплавленного покрытия 70 % — Ni-Si-B, 30 % — MoSi₂

Частицы дисилицида молибдена хорошо смачиваются эвтектикой, происходит их частичное растворение в ней. Твердость по Виккерсу дисперсных дисилицидных

армирующих включений составляет около 1200 кг/мм^2 , а за счет образования боридов и карбоборидов молибдена микротвердость отдельных мелких зерен достигает $2000\text{—}2600 \text{ кгс/мм}^2$.

В данной работе не проводились исследования непосредственно износостойкости полученных покрытий в реальных условиях или в лабораторных испытаниях. Определенные в работе механические характеристики поверхности (твердость по Виккерсу, микротвердость) в большинстве случаев могут служить качественным критерием износостойкости покрытий при абразивном износе, в том числе при одновременном термическом воздействии. Увеличение твердости по Виккерсу в сравнении с основным металлом в 1,5 раза может привести к повышению износостойкости покрытия в 2—10 раз. Указанный подход является вполне корректным оценочным приближением, что было подтверждено в работах, ранее выполненных авторами [10, 17]. Правильное соотношение объемов твердых включений и пластичной матрицы, размеры твердых включений, ударной вязкости материалов включений, смачиваемость твердых включений расплавом матрицы, минимальное количество дефектов приводит к лучшим характеристикам износостойкости.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. На основе анализа данных по высокоскоростным методам получения многоэлементных функциональных композиционных покрытий выбрана шликерная технология с последующим оплавлением покрытия.
2. На основе порошковых смесей состава Ni-Si-B и Ni-Cr-Si-B собственного изготовления и промышленно выпускаемых получены эвтектические покрытия на стальных и молибденовых подложках. Нагрев композитных систем для плавления ингредиентов осуществляли прямым пропусканием тока в вакууме и электроимпульсным воздействием на воздухе.
3. При нагревании образцов прямым пропусканием тока шликерный слой в некоторой

степени изолирует тепловой поток от подложки, влияя на тепловое поле, процесс плавки и последующую кристаллизацию при охлаждении. Варьирование длительности нагрева и толщины шликера позволяет управлять макро- и микроструктурными характеристиками композита.

4. Покрытия хорошо смачивают подложки, что способствует высокой адгезии в системе покрытие — основа. Сравнение структурных характеристик и свойств покрытий показали, что высокоскоростное формирование покрытий оплавлением позволяет с одной стороны получить защитный слой требуемой толщины, а с другой стороны предотвращает чрезмерное охрупчивание материала основы вследствие образования боридных фаз.
5. Получены композиционные покрытия на основе указанных эвтектик с армирующими добавками твердых сплавов и дисилицида молибдена. Установлено, что добавки дисилицида молибдена повышают однородность покрытия, не снижая его твердость. При этом также вполне вероятно повышение жаростойкости покрытия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Азаренков М. О. Функціональні матеріали і покриття: навчальний посібник / М. О. Азаренков, В. М. Береснев, С. В. Литовченко та ін. — Х.: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2013. — 208 с.
2. Материаловедение неравновесного состояния модифицированной поверхности: монография. / Азаренков Н. А., Соболев О. В., Береснев В. М. и др. — Сумы: Сумской государственной университет, 2012. — 683 с.
3. Азаренков М. О., Береснев В. М., Литовченко С. В., Погребняк А. Д., Маліков Л. В., Гриценко В. І., Кліменко С. А., Копейкіна М. Ю., Турбін П. В., Фаренік В. І. Різальний інструмент з тришаровим покриттям // Патент України на винахід № 89923. — 10. 03. 2010. — Бюл. № 5. — 2010.
4. Strong A. Brent. Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods and Applications / A. Brent Strong — Dearborn, Michigan: Society of manufacturing engineers, 2008. — 620 p.
5. Semenenko V. E. Specific features of

- homogeneous structures formation in heterophase metal-carbide system / V. E. Semenenko, G. F. Kovtun // *Funct. Materials.* — 1998. — Vol. 5, No. 2. — P. 1—7.
6. Голубец В. М. Долговечность эвтектических покрытий в коррозионных средах / В. М. Голубец. — Киев: Наукова думка, 1990. — 118 с.
 7. Сомов А. И. Эвтектические композиции / А. И. Сомов, М. А. Тихоновский — М.: Металлургия, 1975. — 300 с.
 8. Knotek O. Brazing Filler Metals Based on Reacting Ni-Cr-B-Si Alloys / O. Knotek, E. Lugscheider // *Welding Journal supplement.* — 1976. — P. 314—318.
 9. Пашечко М. И. Формирование и фрикционная стойкость эвтектических покрытий / М. И. Пашечко, В. М. Голубец, М. В. Чернец. — Киев: Наукова думка, 1993. — 343 с.
 10. Чишкала В. А. Использование эвтектических композиций для создания износостойких покрытий / В. А. Чишкала, С. В. Литовченко, Е. П. Нечипоренко и др. // *Вопросы атомной науки и техники.* — 2002. — № 1. — С. 175—177.
 11. Голубец В. М. Износостойкие покрытия из эвтектики на основе системы Fe-Mn-C-B / В. М. Голубец, М. И. Пашечко — Киев: Наук. Думка, 1989. — 160 с.
 12. Ajao J. Influence of additions on the solidification behaviour of Ni-B alloys — crystallography of Ni-Ni₃B eutectic / J. Ajao, S. Hammar-Thibault // *Journal of Materials Science* / — 1988. — Vol. 23, Is. 3. — P. 1112—1125.
 13. Tinani M. In situ real-time studies of nickel silicide phase formation / M. Tinani, A. Mueller, Y. Gao, E. A. Irene, Y. Z. Hu, S. P. Tay // *Journal of Vacuum Science & Technology B.* — 2001. — Vol. 19, No. 2. — P. 376—383.
 14. Tokunaga T. Thermodynamic study of phase equilibria in the Ni-Si-B system / T. Tokunaga, K. Nishio, M. Hasebe // *Journal of Phase Equilibria.* — 2001. — Vol. 22, Iss. 3. — P. 291—299.
 15. Jansson B. A thermochemical assessment of liquid-solid equilibria in nickel-rich Ni-Si-B alloys. / B. Jansson, J. Agren // *Materials Science and Engineering* — 1984. — Vol. 63, No. 1. — P. 51—60.
 16. Knotek O. Structure of Ni-rich Ni-Cr-B-Si coating alloys / O. Knotek, E. Lugscheider, H. Reimann // *Journal of Vacuum Science and Technology.* — 1975. — Vol. 12, Is. 4. — P. 770—772.
 17. Литовченко С. В. Формирование металлокерамических покрытий на углеродистой стали / С. В. Литовченко, В. Е. Семененко, В. А. Чишкала // *Вісник Харківського університету. Серія фізична «Ядра, частинки, поля».* — 1998. — № 421. — С. 225—227.
 18. Pogrebnyak A. D. Nanomaterials and nanotechnology / A. D. Pogrebnyak, V. M. Beresnev — N. Y., Bentham, 2010. — 271 p.
 19. Hemmatia I. Electron Microscopy Characterization of Ni-Cr-B-Si-C Laser Deposited Coatings / I. Hemmatia, J. C. Rao, V. Ocelika, J. Th. M. De Hossona / *Microscopy and Microanalysis.* — 2013. — Vol. 19, Iss. 01. — P. 120—131.
 20. Lebaili S. The metallurgical structure of as-solidified Ni-Cr-B-Si-C hardfacing alloys / S. Lebaili, M. Durand-Charre, S. Hamar-Thibault / *Journal of Materials Science.* — 1988. — Vol. 23, Iss. 10. — P. 3603—3611.
 21. Семененко В. Е. Прочностные и диффузионные характеристики ламелярной эвтектической композиции Ni-Ni₃B / В. Е. Семененко, Г. П. Ковтун // *Вісник Харківського університету. Серія фізична «Ядра, частинки, поля».* — 2001. — № 510, Вып. 1/13/. — С. 79—82.
 22. Tokunaga T. Phase Equilibria in the Ni-Si-B System / T. Tokunaga, K. Nishio, H. Ohtani, M. Hasebe // *Materials Transactions.* — 2003. — Vol. 44, No. 9. — P. 1651—1654.

LITERATURA

1. Azarenkov M. O. Funkcional'ni materialy i pokrittya: navchal'nij posibnik / M. O. Azarenkov, V. M. Beresnev, S. V. Litovchenko ta in. — H.: HNU imeni V. N. Karazina, 2013. — 208 p.
2. Materialovedenie neravnovesnogo sostoyaniya modifitsirovannoy poverhnosti: monografiya. / Azarenkov N. A., Sobol' O. V., Beresnev V. M. i dr. — Sumy: Sumskoj gosudarstvennyj universitet, 2012. — 683 p.
3. Azarenkov M. O., Beresnev V. M., Litovchenko S. V., Pogrebnyak A. D., Malikov L. V., Gričenko V. I., Klimenko S. A., Kopejkina M. Yu., Turbin P. V., Farenik V. I. Rizal'nij instrument z trisharovim pokrittyam // *Patent Ukrainy na vinahid No. 89923.* — 10. 03. 2010. — Byul. No. 5. — 2010.
4. Strong A. Brent. Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods and Applications / A. Brent Strong — Dearborn, Michigan: Society of manufacturing engineers, 2008. — 620 p.
5. Semenenko V. E. Specific features of homogeneous structures formation in heterophase metal-carbide system / V. E. Semenenko,

- G. F. Kovtun // *Funct. Materials.* — 1998. — Vol. 5, No. 2. — P. 1—7.
6. Golubec V. M. Dolgovechnost' evtekticheskikh pokrytij v korrozionnyh sredah / V. M. Golubec. — Kiïv: Naukova dumka, 1990. — 118 p.
 7. Somov A. I. Evtecticheskie kompozicii / A. I. Somov, M. A. Tihonovskij — M.: Metallurgiya, 1975. — 300 p.
 8. Knotek O. Brazing Filler Metals Based on Reacting Ni-Cr-B-Si Alloys / O. Knotek, E. Lugscheider // *Welding Journal supplement.* — 1976. — P. 314—318.
 9. Pashechko M. I. Formirovanie i frikcionnaya stojkost' evtekticheskikh pokrytij / M. I. Pashechko, V. M. Golubec, M. V. Chernec. — Kiïv: Naukova dumka, 1993. — 343 p.
 10. Chishkala V. A. Ispol'zovanie evtekticheskikh kompozicij dlya sozdaniya iznosostojkikh pokrytij / V. A. Chishkala, S. V. Litovchenko, E. P. Nechiporenko i dr. // *Voprosy atomnoj nauki i tehniki.* — 2002. — No. 1. — P. 175—177.
 11. Golubec V. M. Iznosostojkie pokrytiya iz evtektiki na osnove sistemy Fe-Mn-C-B / V. M. Golubec, M. I. Pashechko — Kiev: Nauk. Dumka, 1989. — 160 p.
 12. Ajao J. Influence of additions on the solidification behaviour of Ni-B alloys — crystallography of Ni-Ni₃B eutectic / J. Ajao, S. Hamar-Thibault // *Journal of Materials Science.* — 1988. — Vol. 23, Is. 3. — P. 1112—1125.
 13. Tinani M. In situ real-time studies of nickel silicide phase formation / M. Tinani, A. Mueller, Y. Gao, E. A. Irene, Y. Z. Hu, S. P. Tay // *Journal of Vacuum Science & Technology B.* — 2001. — Vol. 19, No. 2. — P. 376—383.
 14. Tokunaga T. Thermodynamic study of phase equilibria in the Ni-Si-B system / T. Tokunaga, K. Nishio, M. Hasebe // *Journal of Phase Equilibria.* — 2001. — Vol. 22, Is. 3. — P. 291—299.
 15. Jansson V. A thermochemical assessment of liquid-solid equilibria in nickel-rich Ni-Si-B alloys. / V. Jansson, J. Agren // *Materials Science and Engineering* — 1984. — Vol. 63, No. 1. — P. 51—60.
 16. Knotek O. Structure of Ni-rich Ni-Cr-B-Si coating alloys / O. Knotek, E. Lugscheider, H. Reimann // *Journal of Vacuum Science and Technology.* — 1975. — Vol. 12, Is. 4. — P. 770—772.
 17. Litovchenko S. V. Formirovanie metallokeramicheskikh pokrytij na uglerodistoj stali / S. V. Litovchenko, V. E. Semenenko, V. A. Chishkala // *Visnik Harkivs'kogo universitetu. Seriya fizichna «Yadra, chastinki, polya».* — 1998. — No. 421. — P. 225—227.
 18. Rogrebnjak A. D. Nanomaterials and nanotechnology / A. D. Rogrebnjak, V. M. Beresnev — N. Y., Bentham, 2010. — 271 p.
 19. Hemmatia I. Electron Microscopy Characterization of Ni-Cr-B-Si-C Laser Deposited Coatings / I. Hemmatia, J. C. Raa, V. Ocelika, J. Th. M. De Hossona / *Microscopy and Microanalysis.* — 2013. — Vol. 19, Iss. 01. — P. 120—131.
 20. Lebaili S. The metallurgical structure of as-solidified Ni-Cr-B-Si-C hardfacing alloys / S. Lebaili, M. Durand-Charre, S. Hamar-Thibault // *Journal of Materials Science.* — 1988. — Vol. 23, Iss. 10. — P. 3603—3611.
 21. Semenenko V. E. Prochnostnye i diffuzionnye harakteristiki lamelyarnoj evtekticheskoy kompozicii Ni-Ni₃B / V. E. Semenenko, G. P. Kovtun // *Visnik Harkivs'kogo universitetu. Seriya fizichna «Yadra, chastinki, polya».* — 2001. — No. 510, Vyp. 1/13/. — P. 79—82.
 22. Tokunaga T. Phase Equilibria in the Ni-Si-B System / T. Tokunaga, K. Nishio, H. Ohtani, M. Hasebe // *Materials Transactions.* — 2003. — Vol. 44, No. 9. — P. 1651—1654.