

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОПЛАВЛЕНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА САМОФЛЮСУЮЩИХСЯ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ*

Е.Е. КОРНИЕНКО¹, канд. техн. наук, доцент

А.А. НИКУЛИНА¹, канд. техн. наук, доцент

А.Г. БАННОВ¹, канд. техн. наук, доцент

В.И. КУЗЬМИН², канд. техн. наук, доцент

М. МИЛЬДЕБРАХ³, инженер

В.А. БЕЗРУКОВА¹, студент

А.А. ЖОЙДИК¹, студент

(¹НГТУ, г. Новосибирск

²ИТПМ СО РАН, г. Новосибирск,

³Ганноверский университет им. Вильгельма Лейбница, г. Гарбсен)

Поступила 5 октября 2016

Рецензирование 21 октября 2016

Принята к печати 15 ноября 2016

Корниенко Е.Е. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: kornienko_ee@mail.ru

Покрyтия из самофлюсующегося порошка марки ПР-Н77Х15С3Р2 (система Ni-Cr-Si-B) наносили на подложку из низкоуглеродистой стали 20 при помощи плазменного напыления. С целью изучения влияния температуры оплавления на структурные и фазовые превращения образцы с покрытиями оплавливали в печи при температурах от 1030 до 1100 °С. Структурные исследования проводили с использованием оптической и растровой электронной микроскопии, энергодисперсионного и рентгенофазового анализов. Кроме того, в статье приведены результаты измерений микротвердости, а также износостойкости в условиях трения скольжения со смазочным материалом по схеме диск–плоскость. В работе показано, что основными структурными составляющими покрытий после оплавления являются дендриты γ -Ni, включения Cr_7C_3 и эвтектика Ni-Ni₃B. Для покрытий, оплавленных ниже 1070 °С, характерно также наличие включений CrB и эвтектики Ni₃B-Ni₆Si₂B, для покрытий, оплавленных при 1100 °С, включений CrB₂ и эвтектики (γ -Ni)-CrB. Выявлено, что с повышением температуры оплавления объемная доля твердых фаз (эвтектики, а также карбидов и боридов хрома) увеличивается, что приводит к росту микротвердости и износостойкости.

Ключевые слова: самофлюсующиеся сплавы на основе никеля, сплавы системы Ni-Cr-Si-B, плазменное напыление, оплавление.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-4-52-62

Введение

Одной из наиболее актуальных проблем современного материаловедения является разработка новых конструкционных материалов,

обладающих высокими технологическими свойствами и способных выдерживать все более жесткие условия работы. Известно, что эксплуатация деталей машин является причиной их износа, а это, в свою очередь, требует заме-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-50197 мол_нр.

ны и увеличивает себестоимость выпускаемой продукции. Кроме того, изготавливать деталь целиком из дорогостоящего износостойкого материала нецелесообразно, так как это связано с высокой стоимостью и трудностью обработки поверхности. Увеличить срок службы ответственных деталей можно путем образования на их поверхности слоя или покрытия, обладающих высоким уровнем требуемых свойств.

Для формирования покрытий, стойких к абразивному износу, используют различные материалы. Известно, что самофлюсующиеся сплавы на основе никеля, а именно сплавы системы Ni-Cr-Si-B, обладают комплексом высоких свойств. Никель характеризуется достаточно высокими показателями пластичности и прочности [1]. Высокая коррозионная стойкость на воздухе, в пресной и морской воде, а также во многих кислотах объясняется образованием на поверхности никеля плотной тонкой пленки NiO [2]. Для повышения стойкости к окислительным средам, а также жаростойкости в никель вводят хром [2, 3]. Добавки бора и углерода (который также присутствует в этих сплавах в небольшом количестве – от 0,3 до 1,2 % в зависимости от марки порошка [4]) обеспечивают формирование разнообразных химических соединений в никелевой матрице, например, боридов хрома и никеля и карбидов хрома, что способствует повышению твердости и износостойкости [3, 5]. Кроме того, введение бора и кремния снижает температуру плавления сплавов и улучшает самофлюсующиеся свойства [2, 3, 6]. Сочетание высокой износостойкости, коррозионной стойкости и жаростойкости обуславливает применение сплавов системы Ni-Cr-Si-B в таких отраслях промышленности, как аэрокосмическая и самолетостроение [7], атомная [8], нефтяная, химическая и металлургия [9].

Существуют различные способы нанесения покрытий из самофлюсующихся сплавов: наплавка (лазерная [10, 11] и плазменно-дуговая [12]) и термическое напыление (плазменное [13–19], пламенное [20, 13], высокоскоростное кислородно-топливное [14]). Наиболее широкое применение нашла технология плазменного напыления, которой в последнее время уделяется повышенное внимание. Данная технология позволяет не только формировать покрытия на поверхностях любой сложности, но и восста-

навливать наиболее изношенные участки деталей. Несмотря на перечисленные достоинства, для плазменных покрытий характерно наличие различного рода дефектов, например, оксидных пленок, пор, нерасплавившихся частиц [12, 21–23]. Перечисленные недостатки ограничивают применение плазменных покрытий в агрессивных средах и способствуют снижению износостойкости [24, 25]. Кроме того, покрытия, полученные по этой технологии, характеризуются структурной и фазовой неоднородностью [25, 26].

Одним из способов повышения качества плазменных покрытий является последующее оплавление [27, 28]. На сегодняшний день выполнено значительное количество работ, посвященных технологии плазменного напыления самофлюсующихся сплавов, но практически не говорится о структурных превращениях, происходящих в результате оплавления сплавов выбранной системы. Таким образом, целью данной работы является исследование влияния температуры оплавления на структуру и свойства самофлюсующихся покрытий.

Материалы и методы исследований

В качестве напыляемого материала в настоящей работе предлагается использование коммерческого самофлюсующегося порошка марки ПР-Н77Х15С3Р2, химический состав которого приведен в табл. 1. Порошок представлял собой сферические частицы размерами 40...100 мкм.

Плазменное напыление выполняли на установке «Термоплазма 50-01» с кольцевым вводом порошка в Институте прикладной и теоретической механики СО РАН. В качестве подложки использовали образцы прямоугольной формы размером 30 × 10 × 10 мм из низкоуглеродистой стали марки 20. Ранее были определены оптимальные режимы плазменного напыления для выбранного порошка: сила тока – 140 А и напряжение – 265 В [23]. Дистанция напыления составляла 170 мм. В качестве плазмообразующего

Таблица 1

Химический состав напыляемого порошка, мас. %

Ni	Cr	B	Si	Fe	Другие
77,6	15,1	2	3,2	2,1	Остальное

газа использовали воздух. Функцию защитного, транспортирующего и фокусирующего газов выполняла смесь воздуха и пропан-бутана. Перед напылением покрытий поверхность стальных заготовок очищали при помощи пескоструйной обработки. В качестве подслоя на очищенную поверхность заготовок наносили порошок марки ПН85Ю15.

С целью изучения влияния температуры оплавления на структурные и фазовые превращения, происходящие в покрытиях, образцы нагревали до температур 1030, 1050, 1070 и 1100 °С (время выдержки 10 мин, охлаждение на воздухе). Для проведения термической обработки использовали лабораторные электрические печи камерного типа СНОЛ-1,6.2,5.1/11-ИЗ.

Образцами для структурных исследований, а также измерений микротвердости являлись поперечные микрошлифы, подготовленные по стандартной методике: механическое шлифование и полирование с применением суспензии, содержащей частицы Al_2O_3 . Для травления микроструктуры использовали раствор следующего состава: 10 мл HCl, 0,1 мл HNO_3 и 10 г $FeCl_3$. Микроструктуру образцов исследовали с помощью оптического микроскопа Carl Zeiss Axio Observer A1m, а также растрового электронного микроскопа Carl Zeiss EVO50 XVP с микроанализатором EDS X-Act. Фазовый состав изучали, используя рентгеновский дифрактометр ARL X'TRA в CuK_α -излучении. Дифрактограммы регистрировали в режиме времени $t = 3$ с и шагом $\Delta 2\theta = 0,05^\circ$. Микротвердость структурных составляющих покрытий оценивали на микротвердомере Wolpert Group 402MVD при нагрузке 10 г. Анализ ДСК порошка ПН-Н77Х15СЗР2 проводили на синхронном термическом анализаторе STA 449C Netzch в среде аргона и воздуха. Порошок охлаждали в графитовом тигле от 1100 до 60 °С, скорость охлаждения составляла 10 °С/мин.

Изнашивание образцов с покрытиями проводили в условиях трения скольжения со смазочным материалом по схеме диск–плоскость. Для проведения исследований поверхность образцов со стороны нанесенного покрытия полировали до шероховатости не грубее $Ra = 0,32$ мкм. В качестве индентора использовали диск из закаленной и отпущенной стали 45 (HRC 50). Нагрузка на индентор составляла 400 Н, скорость вращения диска – 150 об/мин, время изнашивания – три часа.

Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 1 представлены результаты термического анализа самофлюсующегося порошка системы Ni-Cr-Si-B при его охлаждении от температуры 1100 °С. Видно, что в диапазоне температур 1100...1011 °С наблюдается сросшийся экзотермический пик, который характеризует процесс кристаллизации исследуемого материала. Пик имеет максимум при температуре 1025 °С и два плеча в районе температур 1038 и 1096 °С, что характеризует множественный процесс кристаллизации.

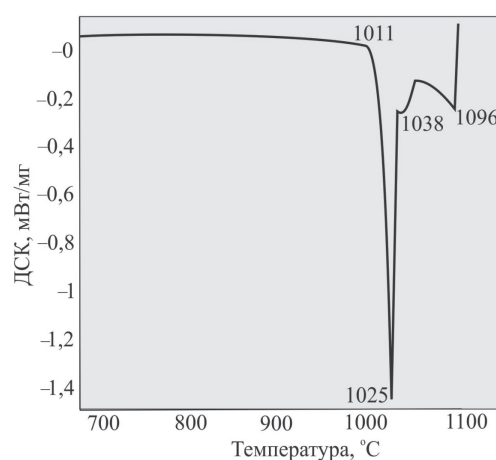
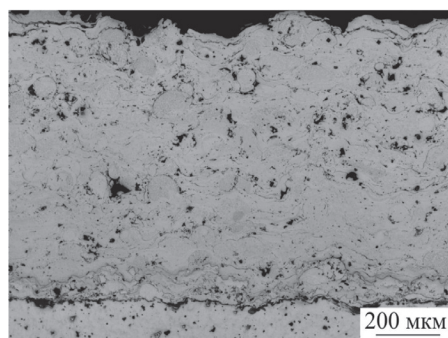


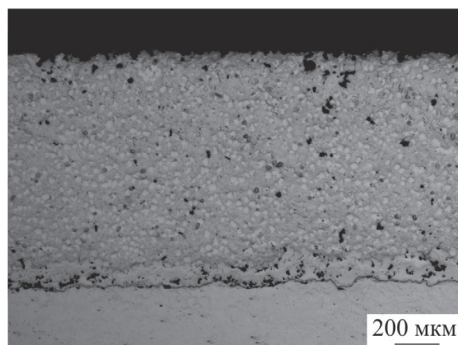
Рис. 1. ДСК-анализ исходного порошка

Согласно полученным данным были подобраны температуры оплавления плазменных покрытий: 1030 и 1100 °С. Кроме того, проводили оплавление и при промежуточных температурах: 1050 и 1070 °С.

Плазменные покрытия до и после оплавления (температура 1030 °С) изображены на рис. 2. Как было показано ранее [23], в основном покрытия состоят из расплавленных в плазменной струе или пластически деформированных частиц. В формировании покрытий участвуют также и исходные (не нагретые) частицы порошка (рис. 2, а). Структура покрытий после оплавления однородна по всему сечению (рис. 2, б). Видно, что оплавление снижает пористость покрытий, но не позволяет полностью избавиться от нее. Стоит отметить, что при подготовке некоторых образцов, нагретых до 1070 °С и выше, для микроструктурного анализа наблюдалось отслоение покрытия и подслоя от подложки, что косвенно может свидетельствовать об их низкой адгезии.

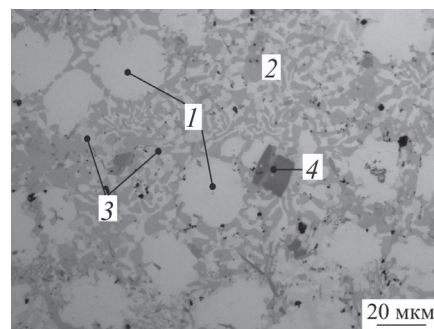


а



б

Рис. 2. Структура самофлюсующихся покрытий до (а) и после (б) оплавления при 1030 °С



а

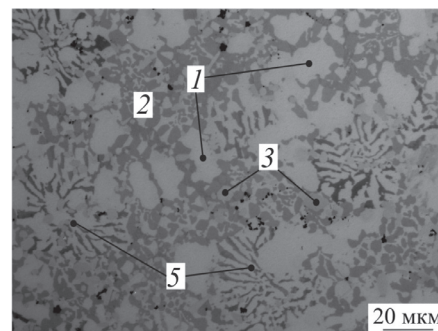


Рис. 3. Структура самофлюсующихся покрытий после оплавления при температуре 1030 (а) и 1100 °С (б)

Согласно данным, полученным при помощи оптической микроскопии, было выявлено, что структура самофлюсующихся покрытий, оплавленных при температурах 1030, 1050 и 1070 °С, подобна, и отличается от структуры покрытий, оплавленных при 1100 °С. В качестве примера на рис. 3 изображены структуры покрытий после оплавления при 1030 и 1100 °С. И в том и в другом случае видны светлые области (1, рис. 3), в основном имеющие округлую форму, пространство между которыми заполнено эвтектикой (2, рис. 3) и светло-серыми включениями (3, рис. 3). Кроме того, в покрытиях наблюдаются темно-коричневые включения: при температурах оплавления ниже 1070 °С включения имеют правильную форму (4, рис. 3, а), при 1100 °С – форму «цветка» (5, рис. 3, б). Нужно отметить, что с увеличением температуры от 1030 до 1070 °С объемная доля фазы 1 уменьшается, а эвтектики 2 и включений 3–5 увеличивается.

На рис. 4 изображены дифракционные картины, полученные от покрытий до оплавления, а также оплавленных при температурах 1070 и 1100 °С. Согласно полученным данным фазовый состав всех покрытий идентичен. Основными фазами являются: γ -Ni, Ni_3B , CrB и Cr_7C_3 .

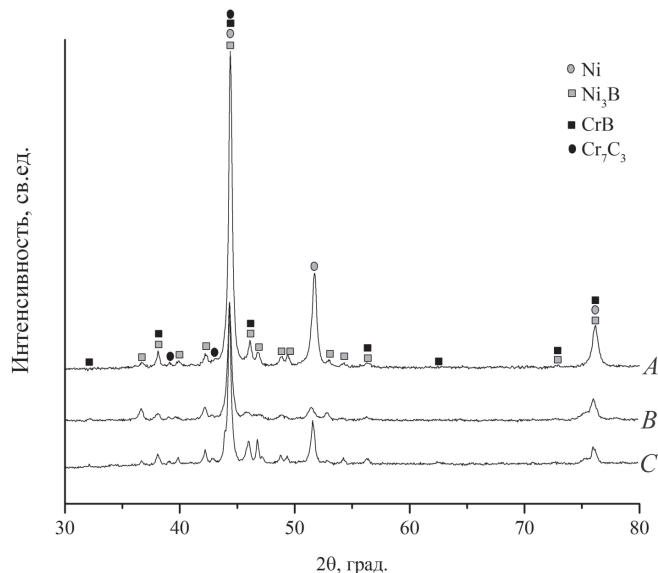
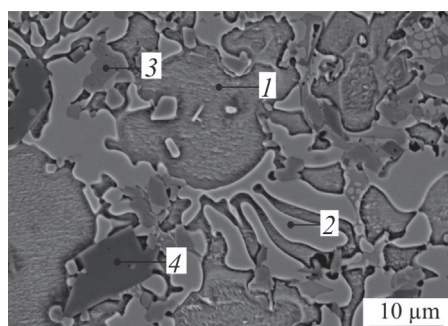
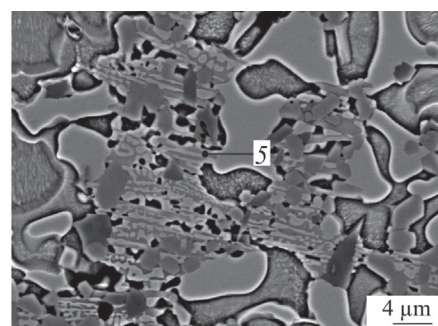


Рис. 4. Рентгенограммы покрытий до оплавления (А) и после оплавления при температурах 1070 °С (В) и 1100 °С (С)

Более детальные изображения структурных составляющих в покрытиях после оплавления, полученные при помощи растрового электронного микроскопа в обратноотраженных электронах, а также результаты микрорентгеноспектрального анализа представлены на рис. 5.

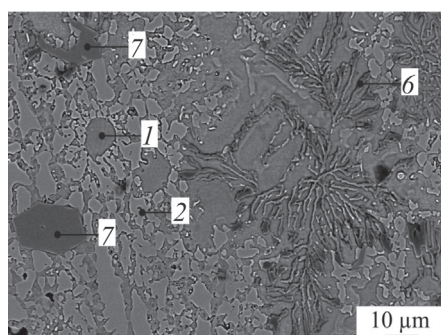


a

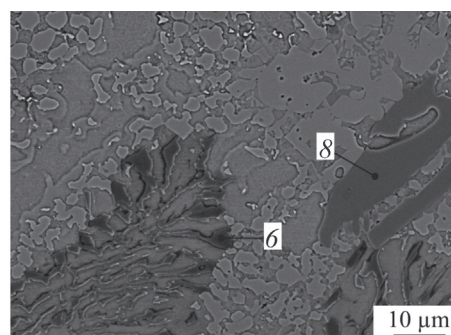


б

Результаты локального химического анализа, ат. %						
Участок	Ni	Cr	Si	Fe	B	C
1	74,38	9,44	9,97	6,21	—	—
2	63,69	3,68	1,63	1,88	29,12	—
3	12,39	55,29	0,64	2,25	—	29,43
4	2,21	41,48	—	—	56,31	—
5	57,66	4,78	16,1	1,88	19,58	—



в



г

Результаты локального химического анализа, ат. %						
Участок	Ni	Cr	Si	Fe	B	C
1	77,11	7,57	9,87	5,45	—	—
2	66,19	2,95	0,56	1,66	28,64	—
6	33,89	39,61	0,78	1,49	24,24	—
7	7,9	30,41	—	—	61,68	—
8	5,37	62,93	—	2,02	—	29,69

Рис. 5. Изображения микроструктуры и данные микрорентгеноспектрального анализа покрытий, оплавленных при температурах 1050 °С (*a, б*) и 1100 °С (*в, г*)

Согласно полученным данным оплавленные покрытия состоят из дендритов твердого раствора Cr, Si и Fe в γ -Ni (1, рис. 5, *a, в*). Междендритное пространство заполнено эвтектикой типа Ni-Ni₃B (2, рис. 5, *a, в*), в которой наблюдаются светло-серые гексагональные включения (3, рис. 5, *a*). Микрорентгеноспектральным анализом показано, что атомное соотношение Cr и C

в этих включениях примерно 7:3. Можно предположить, что это карбиды хрома с химической формулой Cr₇C₃, что подтверждается данными рентгенофазового анализа. В покрытиях, оплавленных при 1100 °С, выделяются также карбиды хрома (Cr₇C₃) неправильной формы (8, рис. 5, *г*). Согласно данным микрорентгеноспектрального анализа, темно-серые ромбические включения

(4, рис. 5, а), которые наблюдаются в структуре покрытий, оплавленных при температурах ниже 1070 °С, представляют собой бориды хрома. Рентгенофазовым анализом показано, что это бориды хрома с химической формулой CrB.

Как было отмечено выше, покрытия, оплавленные при 1100 °С, характеризуются наличием эвтектических областей, имеющих форму «цветка» (5, рис. 3, б). При помощи микрорентгено-спектрального анализа было выявлено, что эти области состоят преимущественно из никеля, хрома и бора (6, рис. 5, в, г). Анализ тройной диаграммы состояния Ni-Cr-B [30] позволяет предположить, что данные области представляют собой эвтектику (γ -Ni)-CrB, что согласуется с данными, полученными авторами работы [31]. Темно-серые прослойки эвтектики – это карбид бора (CrB), светлые – твердый раствор на основе γ -Ni. Стоит отметить, что в покрытиях, оплавленных при этой температуре, наблюдаются также гексагональные включения карбида бора CrB₂ (7, рис. 5, в). Недостаток бора в материале покрытия проявляется в

формировании дефектных кристаллов CrB₂, которые представляют собой пустотелые или недостроенные гексагональные каркасы.

Методом растровой электронной микроскопии было выявлено, что в междендритном пространстве покрытий, оплавленных при температурах ниже 1070 °С, выделяется пластинчатая эвтектика (5, рис. 5, б). Согласно данным локального химического анализа повышенное содержание кремния и бора в этой области может свидетельствовать о присутствии фаз с этими элементами. Анализ тройной диаграммы состояния Ni-Si-B, а также данных работы [29] позволяют предположить, что эта область может представлять собой двойную эвтектику Ni₃B-Ni₆Si₂B. Поскольку объемная доля фазы Ni₆Si₂B мала, ее рефлекс не были зафиксированы на рентгенограмме. Стоит отметить, что эвтектики такого типа в покрытиях, оплавленных при 1100 °С, не встречается.

Влияние температуры оплавления на микротвердость покрытий представлено в табл. 2.

Таблица 2

Средние значения микротвердости покрытий

Без нагрева	После оплавления при температурах (°С):			
	1030	1050	1070	1100
705±133 HV	650,5±125 HV	701,6±139 HV	752,5±151 HV	953,4±255 HV

Согласно полученным данным видно, что микротвердость покрытий возрастает с увеличением температуры оплавления, что можно связать со структурными изменениями. Как было уже сказано, повышение температуры оплавления приводит к увеличению объемной доли твердых фаз (эвтектики, а также карбидов и боридов хрома). Максимальные значения микротвердости соответствует покрытиям, структура которых характеризуется наличием эвтектики Ni – CrB.

Результаты триботехнических испытаний покрытий в условиях трения скольжения со смазкой представлены на рис. 6. Испытанию подвергали образцы с покрытиями до оплавления, а также после оплавления при температурах 1030 и 1100 °С.

Покрyтия без оплавления со временем изнашиваются более интенсивно по сравнению с оплавленными покрытиями, что можно объяснить слабой когезией напыленных частиц.

Минимальный объем изношенного материала зафиксирован при испытаниях покрытий, оплавленных при температуре 1100 °С. Таким образом, можно отметить, что повышение микротвердости способствует снижению износа покрытий данного состава в реализованных условиях трения-скольжения.

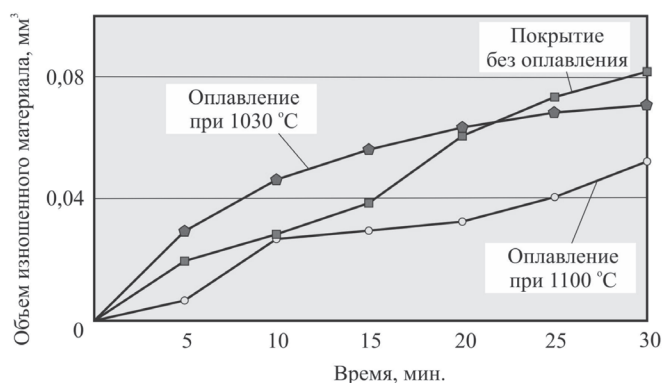


Рис. 6. Износ покрытий до оплавления и после оплавления при температуре 1030 и 1100 °С

Выводы

1. Рентгенофазовым анализом показано, что фазовый состав плазменных покрытий до и после оплавления одинаковый. Основными фазами являются γ -Ni, Ni_3B , CrB и Cr_7C_3 .

2. Методами оптической и растровой электронной микроскопии выявлено, что покрытия системы Ni-Cr-Si-B после оплавления при температурах ниже 1070 °C состоят из дендритов на основе твердого раствора γ -Ni, включений Cr_7C_3 и CrB и двух эвтектик – $\text{Ni-Ni}_3\text{B}$ и $\text{Ni}_3\text{B-Ni}_6\text{Si}_2\text{B}$. Структура покрытий, оплавленных при 1100 °C, представляет собой дендриты на основе твердого раствора γ -Ni, включения Cr_7C_3 и CrB_2 и две эвтектики (γ -Ni)-CrB и $\text{Ni-Ni}_3\text{B}$.

3. Установлено, что с повышением температуры оплавления объемная доля твердых фаз (эвтектики, а также карбидов и боридов хрома) увеличивается, что приводит к росту микротвердости покрытий. Максимальные значения микротвердости (953 HV) соответствуют покрытиям, структура которых характеризуется наличием эвтектики (γ -Ni)-CrB.

4. Минимальный износ характерен для покрытий, оплавленных при температуре 1100 °C, максимальный – для покрытий без оплавления.

5. С точки зрения получения покрытий с максимальной твердостью и износостойкостью необходимо повышать температуру их оплавления. В то же время высокие температуры нагрева могут способствовать отслоению покрытий. Таким образом, наиболее оптимальными температурами оплавления плазменных покрытий системы Ni-Cr-Si-B с подслоем из Ni_3Al являются температуры, не превышающие 1050 °C.

Список литературы

1. Колачев Б.А., Елагин В.И., Ливанов В.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов: учебник для вузов. – М.: МИСиС, 2005. – 432 с.
2. Zeng Z., Kuroda S., Era H. Comparison of oxidation behavior of Ni-20Cr alloy and Ni-base self-fluxing alloy during air plasma spraying // *Surface & Coatings Technology*. – 2009. – Vol. 204. – P. 69–77.
3. Miguel J.M., Guilemany J.M., Vizcaino S. Tribological study of NiCrBSi coating obtained by different processes // *Tribology International*. – 2003. – Vol. 36. – P. 181–187.
4. Газотермическое напыление: учебное пособие / Л.Х. Балдаев, В.Н. Борисов, В.А. Вахалин,

Г.И. Ганноченко, А.Е. Затока, Б.М. Захаров, А.В. Иванов, В.М. Иванов, В.И. Калита, В.В. Кудинов, А.Ф. Пузряков, Ю.П. Сборщиков, Б.Г. Хамидов, Э.Я. Школьников, В.М. Ярославцев; под общ. ред. Л.Х. Балдаева. – М.: Маркет ДС, 2007. – 344 с. ISBN 978-5-7958-0146-9.

5. Microchemical and microstructural studies in a PTA weld overlay of Ni-Cr-Si-B alloy on AISI 304L stainless steel / C. Sudha, P. Shankar, R.V. Subba Rao, R. Thirumurugesan, M. Vijayalakshmi, B. Raj // *Surface & Coatings Technology*. – 2008. – Vol. 202. – P. 2103–2112. – doi: 10.1016/j.surfcoat.2007.08.063.

6. Microstructures of metallic NiCrBSi coatings manufactured via hybrid plasma spray and in situ laser remelting process / N. Serres, F. Hlawka, S. Costil, C. Langlade, F. Machi // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2011. – Vol. 20 (1–2). – P. 336–343. – doi: 10.1007/s11666-010-9565-1.

7. A study on microstructure and flame erosion mechanism of a graded Ni-Cr-B-Si coating prepared by laser cladding / H.-F. Xuan, Q.-Y. Wang, S.-L. Bai, Z.-D. Liu, H.-G. Sun, P.-C. Yan // *Surface & Coatings Technology*. 2014. – Vol. 244. – P. 203–209. – doi: 10.1016/j.surfcoat.2014.02.021.

8. Microstructures and environmental assessment of metallic NiCrBSi coatings manufactured via hybrid plasma spray process / N. Serres, F. Hlawka, S. Costil, C. Langlade, F. Machi // *Surface & Coatings Technology*. – 2010. – Vol. 205. – P. 1039–1046. – doi: 10.1016/j.surfcoat.2010.03.048.

9. Zhang Z., Wang Z., Liang B. Wear characterization of thermal spray welded // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2009. – Vol. 209. – P. 1368–1374. – doi: 10.1016/j.jmatprotec.2008.03.073.

10. Effect of Ni-to-Fe ratio on structure and properties of Ni-Fe-B-Si-Nb coatings fabricated by laser processing / R. Li, Z. Li, J. Huang, P. Zhang, Y. Zhu // *Applied Surface Science*. – 2011. – Vol. 257, iss. 8. – P. 3554–3557. – doi: 10.1016/j.apsusc.2010.11.073.

11. Hemmati I., Ocelik V., Hosson J.Th.M. de. Effects of the alloy composition on phase constitution and properties of laser deposited Ni-Cr-B-Si coatings // *Physics Procedia*. – 2013. – Vol. 41. – P. 302–311. – doi: 10.1016/j.phpro.2013.03.082.

12. Hemmati I., Ocelik V., Hosson J.Th.M. de. Advances in laser surface engineering: tackling the cracking problem in laser-deposited Ni-Cr-B-Si-C alloys // *JOM*. – 2013. – Vol. 65, iss. 6. – P. 741–748. – doi: 10.1007/s11837-013-0594-3.

13. Microstructural study of NiCrBSi coatings obtained by different processes / R. Gonzalez, M.A. Garcia, I. Penuelas, M. Cadenas, M. del R. Fernandez, A.H. Battez, D. Felgueroso // *Wear*. – 2007. – Vol. 263, iss. 1–6. – P. 619–624. – doi: 10.1016/j.wear.2007.01.094.

14. An investigation of the mechanical properties and wear resistance of NiCrBSi coatings carried out by in situ laser remelting / N. Serres, F. Hlawka, S. Costil, C. Langlade, F. Machi // *Wear*. – 2011. – Vol. 270, iss. 9–10. – P. 640–649. – doi: 10.1016/j.wear.2011.01.025.

15. *Saricimen H., Quddus A., Ul-Hamid A.* Hot corrosion behavior of plasma and HVOF sprayed Co- and Ni-based coatings at 900°C // *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. – 2014. – Vol. 50, iss. 3. – P. 391–399. – doi: 10.1134/S2070205114030162.

16. *Liyanage T., Fisher G., Gerlich A.P.* Influence of alloy chemistry on microstructure and properties in NiCrBSi overlay coatings deposited by plasma transferred arc welding (PTAW) // *Surface & Coatings Technology*. – 2010. – Vol. 205, iss. 3. – P. 759–765. – doi: 10.1016/j.surfcoat.2010.07.095.

17. *Gross K.A., Kovalevskis A.* Mold manufacture with plasma spraying // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 1996. – Vol. 5, iss. 4. – P. 469–475.

18. Microstructure and wear properties of nickel-based surfacing deposited by plasma transferred arc welding / C. Guoqing, F. Xuesong, W. Yanhui, L. Shan, Z. Wenlong // *Surface & Coatings Technology*. – 2013. – Vol. 228. – P. 276–282. – doi: 10.1016/j.surfcoat.2012.05.125.

19. *Kesavan D., Kamaraj M.* The microstructure and high temperature wear performance of a nickel base hardfaced coating // *Surface & Coatings Technology*. – 2010. – Vol. 204. – P. 4034–4043. – doi: 10.1016/j.surfcoat.2010.05.022.

20. Corrosion mechanism of NiCrBSi coatings deposited by HVOF / W. Zhao, Y. Wang, L. Dong, K. Wu, J. Xue // *Surface & Coatings Technology*. – 2005. – Vol. 190. – P. 293–298. – doi: 10.1016/j.surfcoat.2004.04.057.

21. Comparative examination of the microstructure and high temperature oxidation performance of NiCrBSi flame sprayed and pack cementation coatings / D. Chaliampalias, G. Vourlias, E. Pavlidou, S. Skolianos, K. Chrissafis, G. Stergioudis // *Applied Surface Science*. – 2009. – Vol. 255, iss. 6. – P. 3605–3612. – doi: 10.1016/j.apsusc.2008.10.006.

22. *Чесов Ю.С., Зверев Е.А., Плохов А.В.* Структура плазменных покрытий из порошкового материала

марки ПГ-С27 // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2010. – № 1. – С. 14–18.

23. *Kornienko E., Smirnov A., Kuz'min V.* Researches structure and properties of self-fluxing coating, obtained by air-plasma // *Applied Mechanics and Materials*. – 2014. – Vol. 698. – P. 405–410. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.698.405.

24. *Sidhu T.S., Prakash S., Agrawal R.D.* Hot corrosion and performance of nickel-based coatings // *Current Science*. – 2006. – Vol. 90, iss. 1. – P. 41–47.

25. Microstructures and mechanical properties of metallic NiCrBSi and composite NiCrBSi-WC layers manufactured via hybrid plasma/laser process / N. Serresa, F. Hlawka, S. Costil, C. Langlade, F. Machi // *Applied Surface Science*. – 2011. – Vol. 257, iss. 12. – P. 5132–5137. – doi: 10.1016/j.apsusc.2010.11.062.

26. Rolling contact fatigue mechanism of a plasma-sprayed and laser-remelted Ni alloy coating / X.C. Zhang, B.S. Xu, S.T. Tu, F.Z. Xuan, Y.K. Zhang, H.D. Wang, Y.X. Wu // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. – 2009. – Vol. 32. – P. 84–96. – doi: 10.1111/j.1460-2695.2008.01305.x.

27. Handbook of thermal spray technology / ed. by J.R. Davis. – Materials Park, OH: ASM International, 2004. – 338 p. – ISBN-10: 0871707950. – ISBN-13: 978-0871707956.

28. Wear behaviour of flame sprayed NiCrBSi coating remelted by flame or by laser / R. Gonzalez, M. Cadenas, R. Fernandez, J.L. Cortizo, E. Rodriguez // *Wear*. – 2007. – Vol. 262. – P. 301–307.

29. *Tokunaga T., Nishio K., Hasebe M.* Thermodynamic study of phase equilibria in the Ni-Si-B system // *Journal of Phase Equilibria*. – 2001. – Vol. 22, N 3. – P. 291–299.

30. Liquidus surface of B-Cr-Ni system / Sh. Omori, K. Koyama, Y. Hashimoto, K. Yamada // *Journal of the Japan Institute of Metals and Materials*. – 1985. – Vol. 49, N 11. – P. 935–939.

31. *Hemmati I., Ocelik V., Hosson J.Th.M. de.* Electron microscopy characterization of Ni-Cr-B-Si-C laser deposited coatings // *Microscopy and Microanalysis*. – 2013. – Vol. 19. – P. 120–131. – doi: 10.1017/S1431927612013839.

OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 4 (73), October – December 2016, Pages 52-62

The influence of flowing temperature on the structure and properties of the self-fluxing coatings**Kornienko E.E.**¹, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: kornienko_ee@mail.ru**Nikulina A.A.**¹, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: _aelita27@mail.ru**Bannov A.G.**¹, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: bannov_a@mail.ru**Kuz'min V.I.**², Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: vikuzmin57@mail.ru**Mildebrath M.**³, Engineer, e-mail: mildebrath@iw.uni-hannover.de**Bezrukova V.A.**¹, student, e-mail: vikabezrukova1995@mail.ru**Zhoidik A.A.**¹, student, e-mail: sashazhoidik@gmail.com¹ Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation² Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, 4/1 Institutskaya str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation³ Leibniz University of Hannover, 2 University str., Garbsen, 30823, Germany**Abstract**

The coatings made of self-fluxing powder of the Ni-Cr-Si-B system (Ni – base; 15.1 wt. % Cr; 2.0 wt. % Si; 2.0 wt. % B; 0.4 wt. % C) are deposited on low carbon steel substrate (0.2 wt. % C) by plasma spraying. The study considers the influence of flowing temperature on structure and properties of the specified materials. The samples with coatings are heated in furnace up to 1030, 1050, 1070 and 1100 °C for 1 hour with the following air cooling. The structure and phase composition of the coatings is investigated using optical and scanning electron microscopy, and X-ray diffractometry. Moreover, the results of microhardness measuring and wear-resistance testing in conditions of sliding friction are demonstrated. X-ray diffractometry showed that the major phases of the coatings before fluxing and after one are the following: γ -Ni, Ni_3B , CrB и Cr_7C_3 . The results obtained using optical and scanning electron microscopy brought out that the coatings fluxed at 1030, 1050 and 1070 °C consist of dendrites of solid solution of Cr, Si and Fe in γ -Ni, Cr_7C_3 , CrB inclusions and Ni- Ni_3B , Ni_3B - $\text{Ni}_6\text{Si}_2\text{B}$ eutectics. The coatings fluxed at 1100 °C consist of dendrites of solid solution of Cr, Si and Fe in γ -Ni, Cr_7C_3 , CrB₂ inclusions and (γ -Ni)-CrB, Ni- Ni_3B eutectics. A quantity of hard phases (eutectic, chromium carbides and chromium borides) increases with the rise of temperature. It leads to increase of microhardness and wear-resistance of the coatings. The results of the experiments demonstrate that the coatings fluxed at 1100 °C have maximum microhardness (953 HV) and wear resistance. Unfortunately, high fluxing temperatures can promote to layer separation.

Keywords

self-fluxing alloys on the Ni base, Ni-Cr-Si-B system alloys, plasma spraying, fluxing.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-4-52-62

References

1. Kolachev B.A., Elagin V.I., Livanov V.A. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka tsvetnykh metallov i spлавov* [Metallurgy and heat treatment of nonferrous metals and alloys]. Moscow, MISIS Publ., 2005. 432 p. ISBN 5-87623-128-2.
2. Zeng Z., Kuroda S., Era H. Comparison of oxidation behavior of Ni-20Cr alloy and Ni-base self-fluxing alloy during air plasma spraying. *Surface & Coatings Technology*, 2009, vol. 204, iss. 1, pp. 69–77. doi: 10.1016/j.surfcoat.2009.06.036
3. Miguel J.M., Guilemany J.M., Vizcaino S. Tribological study of NiCrBSi coating obtained by different processes. *Tribology International*, 2003, vol. 36, pp. 181–187.
4. Baldaev L.Kh., Borisov V.N., Vakhalin V.A., Gannochenko G.I., Zatoka A.E., Zakharov B.M., Ivanov A.V., Ivanov V.M., Kalita V.I., Kudinov V.V., Puzryakov A.F., Sborshchikov Yu.P., Khamitsev B.G., Shkol'nikov E.Ya., Yaroslavl'tsev V.M. *Gazotermicheskoe napylenie* [Thermal spray]. Moscow, Market DS Publ., 2007. 344 p. ISBN 978-5-7958-0146-9.

5. Sudha C., Shankar P., Rao R.V. Subba, Thirumurugesan R., Vijayalakshmi M., Raj B. Microchemical and microstructural studies in a PTA weld overlay of Ni–Cr–Si–B alloy on AISI 304L stainless steel. *Surface & Coatings Technology*, 2008, vol. 202, pp. 2103–2112. doi: 10.1016/j.surfcoat.2007.08.063
6. Serres N., Hlawka F., Costil S., Langlade C., Machi F. Microstructures of metallic NiCrBSi coatings manufactured via hybrid plasma spray and in situ laser remelting process. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2011, vol. 20 (1–2), pp. 336–343. doi: 10.1007/s11666-010-9565-1
7. Xuan H.-F., Wang Q.-Y., Bai S.-L., Liu Z.-D., Sun H.-G., Yan P.-C. A study on microstructure and flame erosion mechanism of a graded Ni–Cr–B–Si coating prepared by laser cladding. *Surface & Coatings Technology*, 2014, vol. 244, pp. 203–209. doi: 10.1016/j.surfcoat.2014.02.021
8. Serres N., Hlawka F., Costil S., Langlade C., Machi F. Microstructures and environmental assessment of metallic NiCrBSi coatings manufactured via hybrid plasma spray process. *Surface & Coatings Technology*, 2010, vol. 205, pp. 1039–1046. doi: 10.1016/j.surfcoat.2010.03.048
9. Zhang Z., Wang Z., Liang B. Wear characterization of thermal spray welded. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, vol. 209, iss. 3, pp. 1368–1374. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2008.03.073
10. Li R., Li Z., Huang J., Zhang P., Zhu Y. Effect of Ni-to-Fe ratio on structure and properties of Ni–Fe–B–Si–Nb coatings fabricated by laser processing. *Applied Surface Science*, 2011, vol. 257, iss. 8, pp. 3554–3557. doi: 10.1016/j.apsusc.2010.11.073
11. Hemmati I., Ocelik V., Hosson J.Th.M. de. Effects of the alloy composition on phase constitution and properties of laser deposited Ni–Cr–B–Si coatings. *Physics Procedia*, 2013, vol. 41, pp. 302–311. doi: 10.1016/j.phpro.2013.03.082
12. Hemmati I., Ocelik V., Hosson J.Th.M. de. Advances in laser surface engineering: tackling the cracking problem in laser-deposited Ni–Cr–B–Si–C alloys. *JOM*, 2013, vol. 65, iss. 6, pp. 741–748. doi: 10.1007/s11837-013-0594-3
13. Gonzalez R., Garcia M.A., Penuelas I., Cadenas M., Fernandez M. del R., Battez A.H., Felgueroso D. Microstructural study of NiCrBSi coatings obtained by different processes. *Wear*, 2007, vol. 263, iss. 1–6, pp. 619–624. doi: 10.1016/j.wear.2007.01.094
14. Serres N., Hlawka F., Costil S., Langlade C., Machi F. An investigation of the mechanical properties and wear resistance of NiCrBSi coatings carried out by in situ laser remelting. *Wear*, 2011, vol. 270, iss. 9–10, pp. 640–649. doi: 10.1016/j.wear.2011.01.025
15. Saricimen H., Quddus A., Ul-Hamid A. Hot corrosion behavior of plasma and HVOF sprayed Co- and Ni-based coatings at 900 °C. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 2014, vol. 50, iss. 3, pp. 391–399. doi: 10.1134/S2070205114030162
16. Liyanage T., Fisher G., Gerlich A.P. Influence of alloy chemistry on microstructure and properties in NiCrBSi overlay coatings deposited by plasma transferred arc welding (PTAW). *Surface & Coatings Technology*, 2010, vol. 205, iss. 3, pp. 759–765. doi: 10.1016/j.surfcoat.2010.07.095
17. Gross K.A., Kovalevskis A. Mold manufacture with plasma spraying. *Journal of Thermal Spray Technology*, 1996, vol. 5, iss. 4, pp. 469–475.
18. Guoqing C., Xuesong F., Yanhui W., Shan L., Wenlong Z. Microstructure and wear properties of nickel-based surfacing deposited by plasma transferred arc welding. *Surface & Coatings Technology*, 2013, vol. 228, pp. 276–282. doi: 10.1016/j.surfcoat.2012.05.125
19. Kesavan D., Kamaraj M. The microstructure and high temperature wear performance of a nickel base hardfaced coating. *Surface & Coatings Technology*, 2010, vol. 204, pp. 4034–4043. doi: 10.1016/j.surfcoat.2010.05.022
20. Zhao W., Wang Y., Dong L., Wu K., Xue J. Corrosion mechanism of NiCrBSi coatings deposited by HVOF. *Surface & Coatings Technology*, 2005, vol. 190, pp. 293–298. doi: 10.1016/j.surfcoat.2004.04.057
21. Chaliampalias D., Vourlias G., Pavlidou E., Skolianos S., Chrissafis K., Stergioudis G. Comparative examination of the microstructure and high temperature oxidation performance of NiCrBSi flame sprayed and pack cementation coatings. *Applied Surface Science*, 2009, vol. 255, iss. 6, pp. 3605–3612. doi: 10.1016/j.apsusc.2008.10.006
22. Chosov Yu.S., Zverev E.A., Plokhov A.V. Struktura plazmennyykh pokrytii iz poroshkovogo materiala marki PG-S27 [Structure of plasma wear-resistant coatings of powdered ПГ-С27]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2010, no. 1, pp. 14–18.
23. Kornienko E., Smirnov A., Kuz'min V. Researches structure and properties of self-fluxing coating, obtained by air-plasma. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 698, pp. 405–410. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.698.405
24. Sidhu T.S., Prakash S., Agrawal R.D. Hot corrosion and performance of nickel-based coatings. *Current Science*, 2006, vol. 90, iss. 1, pp. 41–47.

25. Serresa N., Hlawka F., Costil S., Langlade C., Machi F. Microstructures and mechanical properties of metallic NiCrBSi and composite NiCrBSi-WC layers manufactured via hybrid plasma/laser process. *Applied Surface Science*, 2011, vol. 257, iss. 12, pp. 5132–5137. doi: 10.1016/j.apsusc.2010.11.062
26. Zhang X.C., Xu B.S., Tu S.T., Xuan F.Z., Zhang Y.K., Wang H.D., Wu Y.X. Rolling contact fatigue mechanism of a plasma-sprayed and laser-remelted Ni alloy coating. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2009, vol. 32, pp. 84–96. doi: 10.1111/j.1460-2695.2008.01305.x
27. Davis J.R., ed. *Handbook of thermal spray technology*. Materials Park, OH, ASM International, 2004. 338 p. ISBN-10: 0871707950. ISBN-13: 978-0871707956.
28. Gonzalez R., Cadenas M., Fernandez R., Cortizo J.L., Rodriguez E. Wear behaviour of flame sprayed NiCrB-Si coating remelted by flame or by laser. *Wear*, 2007, vol. 262, pp. 301–307.
29. Tokunaga T., Nishio K., Hasebe M. Thermodynamic study of phase equilibria in the Ni-Si-B system. *Journal of Phase Equilibria*, 2001, vol. 22, no. 3, pp. 291–299.
30. Omori Sh., Koyama K., Hashimoto Y., Yamada K. Liquidus surface of B-Cr-Ni system. *Journal of the Japan Institute of Metals and Materials*, 1985, vol. 49, no. 11, pp. 935–939.
31. Hemmati I., Ocelik V., Hosson J.Th.M. de. Electron microscopy characterization of Ni-Cr-B-Si-C laser deposited coatings. *Microscopy and Microanalysis*, 2013, vol. 19, pp. 120–131. doi: 10.1017/S1431927612013839

Funding

The research was funded by RFBR, according to the research project No. 16-38-50197 mol_nr.

Article history

Received 5 October 2016

Revised 21 October 2016

Accepted 15 November 2016