

УДК 621.791.927.5
DOI: 10.25206/1813-8225-2018-158-5-9

Е. Н. ЕРЕМИН
А. С. ЛОСЕВ
С. А. БОРОДИХИН
А. Е. МАТАЛАСОВА
И. А. ПОНОМАРЕВ

Омский государственный
технический университет,
г. Омск

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ КОРРОЗИОННО-СТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ, НАПЛАВЛЕННЫХ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКОЙ С КОМПЛЕКСОМ $\text{VN-TiB}_2\text{-ZrB}_2$

Объектом исследований являлся металл покрытия, наплавленного высокохромистого порошковой проволокой легированной комплексом $\text{VN-TiB}_2\text{-ZrB}_2$. Исследовано изменения дюрометрических свойств и тонкой структуры покрытия в результате отпуска и последующей закалки. Показано, что упрочнение металла такого покрытия в результате закалки заключается в образовании сложной композиционной структуры с железо-хромистой мартенситной матрицей, большим количеством эвтектики и частиц упрочняющих комплексов, что приводит к повышению твердости и износостойкости. Установлено, что фазовые превращения в металле такого покрытия обусловлены образованием эвтектической составляющей на базе боридов хрома и железа, имеющих каркасное строение и большого количества дисперсных частиц нитридов титана размером до 2,5 мкм.

Ключевые слова: наплавка, порошковая проволока, хромистая сталь, боридные соединения, термообработка покрытия, мартенсит, твердость металла, структура покрытия.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-01224).

Введение. В повышении комплекса свойств деталей машиностроительного производства, определяющих срок их службы и надежность в эксплуатации, значительная роль принадлежит различным методам нанесения покрытий [1]. Одним из таких методов нанесения покрытий, широко применяющихся в настоящее время, является наплавка рабочих поверхностей деталей порошковыми прово-

локами [2]. Так, для наплавки деталей различного назначения в нефтехимическом производстве широкое распространение получили порошковые проволоки, содержащие от 13 до 25 % хрома [3]. Они позволяют получать покрытия, обладающие высокой коррозионной стойкостью. Однако такие покрытия обладают низкой износостойкостью при работе в условиях трения. Вместе с тем порошковые

проволоки позволяют за счет ввода в их состав различных легирующих элементов обеспечить повышение твердости и, соответственно, износостойкости наплавленных покрытий.

Известно, что высокие и стабильные механические и эксплуатационные свойства сталей можно получить, комбинируя твердорастворное упрочнение и упрочнение частицами второй фазы (карбидами, нитридами, боридами, интерметаллидами) в матрице на основе железа.

Одним из таких эффективных методов упрочнения металла является легирование его бором [4–9]. При наплавке для этого используют такие соединения бора, как ферробор, карбид бора, диборид хрома, диборид титана [4, 7–9]. Ранее выполненными исследованиями авторов установлено положительное влияние диборидов титана и циркония на износостойкость хромоникелевых мартенситно-старенных сталей, наплавленных порошковыми проволоками [9–11].

Довольно широкое применение для легирования аустенитных и аустенитно-ферритных коррозионно-стойких сталей нашел азот [12–17]. Азот повышает способность к деформационному упрочнению, существенно увеличивает способность стали сопротивляться распространению трещин и ее износостойкость. Некоторое применение нашел азот и для легирования сталей с мартенситной структурой. Такая сталь оказывается более прочной, чем сталь с углеродом, в то время как и показатели износостойкости достигают более высоких значений, чем, например, у известной стали Гадфильда [12]. Необходимо отметить, что обычно азот вводят в расплав за счет использования азотированного хрома или феррохрома.

Вместе с тем особый интерес представляет использование, для этих целей, нитрида бора, являющегося, вследствие сходства ряда свойств, электронным аналогом углерода [18].

Авторами показана перспективность применения наплавочной порошковой проволоки легированной комплексом $\text{BN-TiB}_2\text{-ZrB}_2$ [11]. Однако выполненные исследования относятся только к металлу покрытий в состоянии после наплавки. В то же время твердость таких покрытий довольно высока, что затрудняет их механическую обработку. Поэтому требуется проведение отпуска наплавленного металла, а затем после механической обработки его закалка.

Вместе с тем процессы упрочнения такого покрытия и окончательные его свойства не изучены.

Исходя из этого целью работы является исследование изменений дюрOMETрических свойств и тонкой структуры такого покрытия в результате отпуска и последующей закалки.

Объекты и методы исследований. В работе исследовали металл, полученный наплавкой порошковой проволокой содержащей: 15 % Cr, 0,5 % BN, 1,25 % TiB_2 , 0,5 % ZrB_2 . Исследовался металл после тер-

мической обработки на режимах, установленных ранее: отпуск 800 °C в течение 2 часов и закалка при 1020 °C [19].

Наплавку осуществляли на пластины из стали Ст3 размером 200×50×10 мм опытными порошковыми проволоками диаметром 2,4 мм в аргоне в три слоя. Режим наплавки: сила тока 230 А; напряжение 24 В; скорость наплавки 20 м/ч.

Металлографические исследования наплавленного металла проводили на оптическом микроскопе AXIO Observer A1m (Carl Zeiss). Микроструктура выявлялась химическим травлением в реактиве состава: CuSO_4 — 4 г; HCl — 20 мл; H_2O — 20 мл.

ДюрOMETрические исследования проводили на образцах из металла после наплавки с помощью твердомеров ТК-2 по методу Роквелла и Shimadzu HNV-2 по методу Виккерса.

Электронно-микроскопические исследования проводили на растровом электронном микроскопе JEOL JSM-6610-LV с приставкой Inca-350 энергодисперсионного анализа (ЭДА). Исследования тонкой структуры металла осуществляли на фольгах с использованием просвечивающего электронного микроскопа ЭМВ-100А при ускоряющем напряжении 100 кВ.

Результаты и обсуждение. Металл покрытия, полученного порошковой проволокой с комплексом — 0,5 % BN, 1,25 % TiB_2 , 0,5 % ZrB_2 , в состоянии после наплавки имеет твердость начиная со второго слоя 52–57 HRC. Микротвердость структурных составляющих такого металла составляет для матрицы 617–648 HV, эвтектики 764–847 HV и упрочняющих фаз 1128–1247 HV [11].

Установлено, что микротвердости структурных составляющих такого наплавленного металла после отпуска исследуемого покрытия существенно изменились (рис. 1, табл. 1).

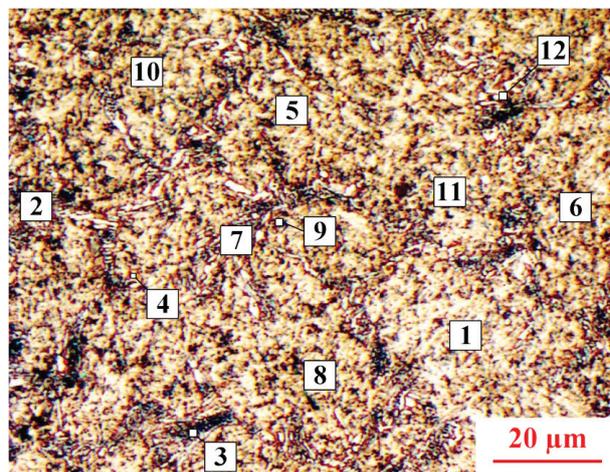


Рис. 1. Микроструктура металла покрытия и области замеров микротвердости структурных составляющих металла с боридами после отпуска

Таблица 1

Микротвердость $\text{HV}_{0,01}$ и $\text{HV}_{0,05}$ структурных составляющих металла с боридами после отпуска

№ укола	1	2	3	4*	5	6	7	8	9*	10	11	12
HV	357	608	629	783	386	366	603	408	593	371	384	675

Таблица 2

Распределение твердости по сечению металла
покрытия с боридами после закалки

Основной металл	Зона сплавления	Распределение твердости по слоям наплавленного металла, HRC			
		1	2	3	4
10	16,5	52	54	53	51
9	15,5	51	53	54	52

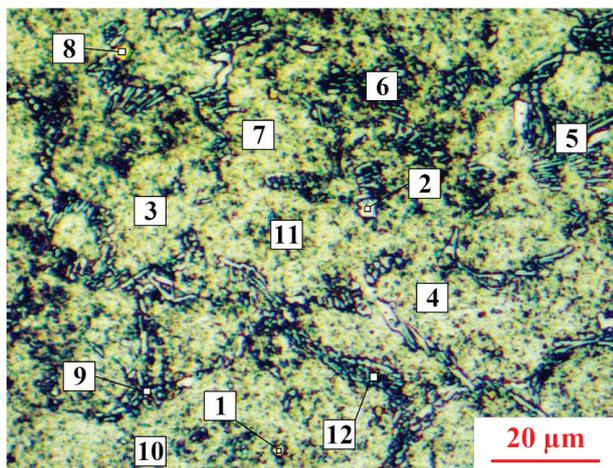
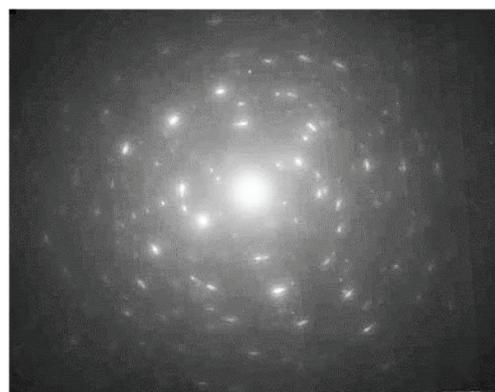


Рис. 2. Области замеров и значения микротвердости структурных составляющих металла покрытия с боридами после закалки



а)



б)

Рис. 3. Микроструктура металла покрытия, наплавленного порошковой проволокой с боридами, после закалки, полученная ПЭМ:
а — тонкая структура ($\times 18000$); б — микродифракция

Таблица 3

Микротвердость $HV_{0,01}$ и $HV_{0,05}$ структурных составляющих металла покрытия с боридами после закалки

№ укола	1*	2*	3	4	5	6	7	8*	9*	10	11	12
HV	1015	558	617	636	756	688	612	1045	882	656	624	841

Как видно, микротвердость структурных составляющих металла с боридами после отпуска существенно снизилась для матрицы до 357–408 HV, эвтектики до 593–629 HV и упрочняющих фаз до 675–783 HV.

После закалки наплавленный металл покрытия имеет сложную композиционную структуру с мартенситной матрицей, большого количества эвтектики и частиц упрочняющих фаз. Твердость такого металла достигает максимального значения в 54 HRC (табл. 2).

ДюрOMETрические исследования показали существенные различия в микротвердости структурных составляющих металла исследуемого покрытия после закалки (рис. 2, табл. 3).

Микротвердость структурных составляющих металла, наплавленного порошковой проволокой с боридами, после закалки значительно повысилась и составила для матрицы 558–688 HV, эвтектики 756–882 HV и упрочняющих фаз 1015–1045 HV.

Электронно-микроскопические исследования структуры позволяют установить закономерности упрочнения такого металла вследствие его закалки. Результаты просвечивающей электронной микроскопии тонкой структуры металла после закалки приведены на рис. 3.

Такой металл представляет собой пересыщенный легирующими элементами α -твердый раствор с развитой и замкнутой эвтектикой. Его структура характеризуется большим количеством, особой морфологией и химическим составом эвтектики и промежуточных фаз. Наряду с мартенситной матрицей имеют место эвтектика и упрочняющие фазы.

При больших увеличениях обнаруживается σ -фаза (рис. 3б).

Результаты сканирующего электронно-микроскопического анализа покрытия наплавленного порошковой проволокой с боридами после закалки приведены на рис. 4.

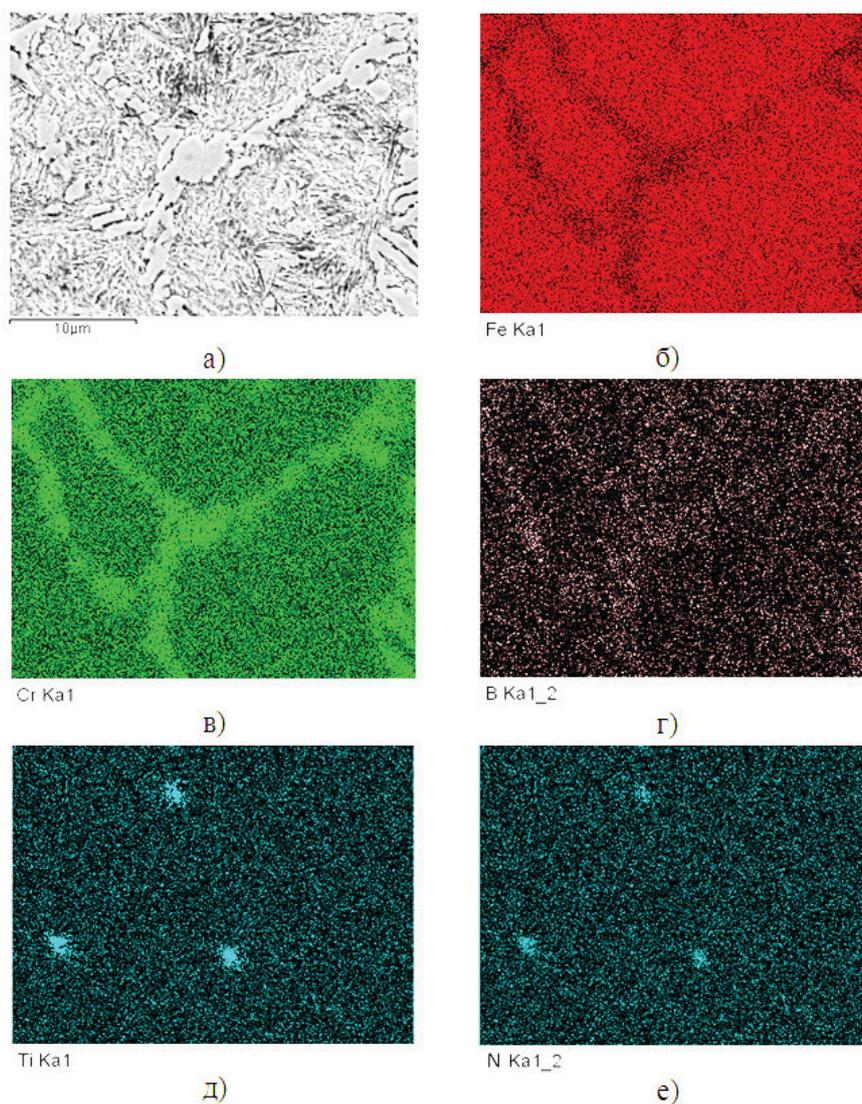


Рис. 4. Растровая электронная микроскопия структуры покрытия после закалки:
а — изображение микроструктуры;
б–е — карты распределения основных элементов в структуре покрытия

Результаты сканирующей электронной микроскопии показывают, что хром и железо связаны углеродом и бором, а титан и цирконий — азотом.

Таким образом, структура металла покрытия (рис. 4а), наплавленного хромистой порошковой проволокой, легированной комплексом $\text{BN-TiB}_2\text{-ZrB}_2$, представляет собой железо-хромистую мартенситную матрицу с эвтектической составляющей, основой которой является сложный борид хрома и железа, имеющий каркасное строение.

Железо-хромистая мартенситная матрица характеризуется наличием значительного количества упрочняющих компонентов, образованных дисперсными включениями в основном нитридов титана размером до 2,5 мкм.

Заключение. Упрочнение металла коррозионно-стойких покрытий, наплавленных порошковой проволокой, легированной комплексом $\text{BN-TiB}_2\text{-ZrB}_2$, в результате закалки заключается в образовании сложной композиционной структуры с железо-хромистой мартенситной матрицей, большим количеством эвтектики и частиц упрочняющих комплексов, что приводит к повышению твердости и износостойкости.

Фазовые превращения в металле такого покрытия обусловлены образованием эвтектической составляющей на базе боридов хрома и железа, имеющего каркасное строение и большого количества дисперсных частиц нитридов титана размером до 2,5 мкм.

Библиографический список

1. Соколов Г. Н. Способы наплавки и плакирования металлов. Волгоград: ВолгГТУ, 2002. 80 с. ISBN 5-230-04018-1.
2. Юзвенко Ю. А., Кирелюк Г. А. Наплавка порошковой проволокой. М.: Машиностроение. 1975. 45 с.
3. Наплавочные материалы стран-членов СЭВ. Каталог. Киев; М.: ВИНТИ, 1979. 619 с.
4. Лякишев Н. П., Плинер Ю. Л., Лаппо С. И. Боросодержащие стали и сплавы. М.: Металлургия, 1986. 192 с.
5. Zhong L., Xiang C., Yan-xiang L. [et al.]. High boron iron-based alloy and its modification // Journal of iron and steel research, International. 2009. Vol. 16, no. 3. P. 37–42. DOI: 10.1016/S1006-706X(09)60041-8.
6. Raghavan V. B – Cr – Fe – Ti (Boron – Chromium – Iron – Titanium) // Journal of Phase Equilibria. 2003. Vol. 24, no. 5. P. 459–460.

7. Артемьев А. А., Соколов Г. Н., Дубцов Ю. Н. [и др.]. Формирование композиционной структуры износостойкого наплавленного металла с боридным упрочнением // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2011. № 2. С. 44–48.

8. Yeregin Ye. N., Losev A. S. Mechanical properties and thermal stability a maraging steel with borides, deposited with a flux-cored wire // Welding International. 2014. Vol. 28, Issue 6. P. 465–468. DOI: 10.1080/09507116.2013.840041.

9. Eremin E. N. Using boride compounds in flux-cored wires for depositing maraging steel // Welding International. 2013. Vol. 27, Issue 2. P. 144–146. DOI: 10.1080/09507116.2012.695546.

10. Лосев А. С., Еремин Е. Н., Филиппов Ю. О. Исследование влияния боридов на упрочнение мартенситостареющей стали // Омский научный вестник. 2010. № 2 (90). С. 131–134.

11. Eremin E. N., Losev A. S., Borodikhin S. A. [et. al.]. Effect of the boride-nitride hardening on the structure and properties of chromium steel deposited with a flux-cored wire // Oil and Gas Engineering (OGE-2017). AIP Conference Proceedings. 2017. Vol. 1876, Issue 1. P. 020071-1–020071-6. DOI:10.1063/1.4998891.

12. Костина М. В., Банных О. А., Блинов В. М. Хромистые коррозионноустойчивые стали, легированные азотом, новый класс конструкционных сталей // Технология металлов. 2000. № 10. С. 2–12.

13. Калянов В. Н. Наплавка азотистыми сплавами // Автоматическая сварка. 2002. № 10. С. 50–51.

14. Sokolov G. N., Artem'ev A. A., Dubcov Yu. N. [et al.]. The structure and properties of the modified nitrogenated high-chromium steel for surfacing the parts of oil and gas equipment // Oil and Gas Engineering (OGE-2017). AIP Conference Proceedings. 2017. Vol. 1876, Issue 1:020072. P. 020072-1–020072-5. DOI: 10.1063/1.4998892.

15. Di Schino A., Barteri M., Kenny J. V. Grain size dependence of mechanical, corrosion and tribological properties of high nitrogen stainless steels // Journal of Materials Science. 2003. Vol. 38, Issue 15. P. 3257–3262. DOI: 10.1023/A:1025181820252.

16. Шпайдель М. О. Новые азотсодержащие аустенитные нержавеющие стали с высокими прочностью и пластичностью // Металловедение и термическая обработка металлов. 2005. № 11 (605). С. 9–13.

17. Шлямнев А. П. Азотсодержащие нержавеющие стали — структура, свойства, перспективы производства и применения // Проблемы чёрной металлургии и материаловедения. 2007. № 1. С. 53–60.

18. Курдюмов А. В., Пилянкевич А. Н. Фазовые превращения в углероде и нитриде бора. Киев: Наукова думка, 1979. 188 с.

19. Еремин Е. Н., Лосев А. С., Бородихин С. А. [и др.]. Влияние термической обработки на структуру и свойства по-

крытий на основе мартенситной хромистой стали, полученных наплавкой порошковой проволокой // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2017. Т. 1, № 2. С. 41–46.

ЕРЕМИН Евгений Николаевич, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Машиностроение и материаловедение», декан машиностроительного института.

SPIN-код: 2894-2461

Author ID (РИНЦ): 175269

Researcher ID (WoS): J-4245-2013

Author ID (SCOPUS): 6603904601

ЛОСЕВ Александр Сергеевич, старший преподаватель кафедры «Машиностроение и материаловедение».

SPIN-код: 9113-2343

Author ID (РИНЦ): 175492

Author ID (SCOPUS): 560174102200

БОРОДИХИН Сергей Александрович, ассистент кафедры «Машиностроение и материаловедение».

SPIN-код: 1591-6595

Author ID (РИНЦ): 827977

Author ID (SCOPUS): 57195568682

МАТАЛАСОВА Арина Евгеньевна, студентка гр. С-131 машиностроительного института.

SPIN-код: 5333-6088

Author ID (РИНЦ): 831303

ПОНОМАРЕВ Иван Андреевич, студент гр. С-131 машиностроительного института.

SPIN-код: 2449-7378

Author ID (РИНЦ): 829101

Адрес для переписки: e-mail: weld_techn@mail.ru

Для цитирования

Еремин Е. Н., Лосев А. С., Бородихин С. А., Маталасова А. Е., Пономарев И. А. Применение термической обработки для упрочнения коррозионноустойчивых покрытий, наплавленных порошковой проволокой с комплексом BN-TiB₂-ZrB₂ // Омский научный вестник. 2018. № 2 (158). С. 5–9. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-158-5-9.

Статья поступила в редакцию 14.02.2018 г.

© Е. Н. Еремин, А. С. Лосев, С. А. Бородихин, А. Е. Маталасова, И. А. Пономарев