Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный университет»

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
ИЗУЧЕНИЯ КЛАСТЕРОВ,
НАНОСТРУКТУР
И НАНОМАТЕРИАЛОВ**

**PHYSICAL AND CHEMICAL ASPECTS
OF THE STUDY OF CLUSTERS,
NANOSTRUCTURES AND
NANOMATERIALS**

**FIZIKO-HIMIČESKIE ASPEKTY
IZUČENIÂ KLASTEROV,
NANOSTRUKTUR I NANOMATERIALOV**

МЕЖВУЗОВСКИЙ СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

выпуск 11

ТВЕРЬ 2019

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Ф50

Рецензирование статей осуществляется на основании Положения о рецензировании статей и материалов для опубликования в Межвузовском сборнике научных трудов «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов».

Официальный сайт издания в сети Интернет:

<https://www.physchemaspects.ru>

Ф50 Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2019. – Вып. 11. – 680 с.

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 7747789 от 13.12.2011.

Издание составлено из оригинальных статей, кратких сообщений и обзоров теоретического и экспериментального характера, отражающих результаты исследований в области изучения физико-химических процессов с участием кластеров, наноструктур и наноматериалов физики, включая межфазные явления и нанотермодинамику. Сборник предназначен для научных и инженерно-технических работников, преподавателей ВУЗов, студентов и аспирантов. Издание подготовлено на кафедре общей физики Тверского государственного университета.

Переводное название: Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials

Транслитерация названия: Fiziko-himičeskie aspekty izučeniâ klasterov, nanostruktur i nanomaterialov

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Print ISSN 2226-4442

Online ISSN 2658-4360

© Коллектив авторов, 2019

© Тверской государственнй университет, 2019

УДК 621.785:669.14.08

Оригинальная статья

НАСЫЩЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ ТИТАНОМ И БОРОМ ЭЛЕКТРОННО-ИОННО-ПЛАЗМЕННЫМ МЕТОДОМ: ФАЗОВО-СТРУКТУРНЫЙ СОСТАВ

А.А. Клопотов¹, Ю.Ф. Иванов², Е.А. Петрикова², А.Д. Тересов², О.С. Толкачев²,
О.Г. Волокитин¹, В.Д. Клопотов³

¹ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет»
634002, Россия, Томск, пл. Соляная, 2

²ФГБУН «Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН»
634055, Россия, Томск, пр-т Академический, 2/3

³ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический
университет»

634050, Россия, Томск, пр-т Ленина, 30
klopotovaa@tsuab.ru¹, yufi55@mail.ru²

DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.605

Аннотация: Осуществлен анализ диаграмм состояния систем $Fe-B-Ti$, $Fe-Cr-B$ и $Fe-Cr-Ti$, описывающих фазовые превращения в высокохромистой нержавеющей стали 12X18H10T, легированной титаном и бором. Показано, что в условиях высокоскоростной закалки, реализуемой при электровзрывном легировании титаном и бором и последующем облучении интенсивным импульсным электронным пучком, в стали формируются лишь двухэлементные соединения.

Ключевые слова: аустенитная сталь, титан, бор, диаграмма состояния, интенсивный импульсный электронный пучок, электровзрывное легирование, фазовый состав, дефектная субструктура.

1. Введение

В числе распространенных методик, применяемых в промышленности для повышения эксплуатационных свойств сталей различных марок, значится борирование, суть которого заключается в формировании в поверхностном слое металла боридов железа [1]. Результатом борирования является существенное повышение износостойкости изделий вследствие увеличения поверхностной твердости стали. При многокомпонентном борировании в качестве износостойкой составляющей композиционных материалов перспективен диборид титана [2]. Данное соединение обладает высокой твердостью и износостойкостью, низким значением коэффициента термического расширения, не подвергается пластической деформации [2, 3]. Сдерживающими факторами широкого использования в промышленности борирования являются длительность процесса (десятки часов), высокая температура (1000–1200 °C), высокая взрывоопасность некоторых борлирующих смесей газов и низкий уровень экологичности процесса.

Одним из перспективных подходов по модификации поверхности стали является метод, в основе которого лежит электровзрывное легирование металлами и неметаллами с последующим облучением

интенсивным импульсным электронным пучком [4, 5]

Целью настоящей работы является анализ перспектив борирования высокохромистой нержавеющей стали комплексным методом, сочетающим электровзрывное легирование титаном и бором и последующее облучение интенсивным импульсным электронным пучком.

2. Материал и методики исследования

В качестве материала исследований была использована нержавеющая сталь марки 12X18H10T [6]. Образцы имели форму пластинок размерами 10×10×5 мм. Насыщение поверхностного слоя стали бором и титаном осуществляли комплексным методом, сочетающим электровзрывное легирование (установка ЭВУ 60/10 [7]) и последующее облучение низкоэнергетичным интенсивным импульсным электронным пучком (установка «СОЛО» [8]). В качестве электропроводящего материала использовали фольгу технически чистого титана марки BT1-0. Навеска порошка бора располагалась на фольге титана. Использовали порошок аморфного бора (В-99В-ТУ 1-92-1549, $B > 99\%$, диаметр частиц $0,5 \div 5$ мкм). Параметры электровзрывного легирования: плотность мощности воздействия $2,2 \text{ ГВт/м}^2$; длительность импульса воздействия 100 мкс; масса фольги титана изменялась в пределах от 360,7 мг до 455,2 мг; масса порошка бора от 50 мг до 87,5 мг. Параметры электронно-пучковой обработки: плотность энергии пучка электронов 40 Дж/см^2 и 20 Дж/см^2 , длительность импульса воздействия пучка электронов 200 мкс и 50 мкс, количество импульсов 3. Выбор режима облучения был основан на результатах моделирования температурного поля [9].

Исследование структуры стали осуществляли методами рентгенофазового анализа (дифрактометр XRD 6000) и просвечивающей дифракционной электронной микроскопии (прибор JEM-2100F). Изучение элементного состава образцов осуществляли методами микрорентгеноспектрального анализа.

3. Результаты и обсуждение

Насыщение поверхностного слоя стали 12X18H10T титаном и бором сопровождается формированием многоэлементного материала, основными элементами которого являются Fe, Cr, Ti и B . Анализ диаграмм состояния показывает, что при термодинамически равновесных условиях в системе $Ti-B-Fe$ отсутствуют трехкомпонентные соединения. Очевидно, что бор подавляет образование тройных соединений на основе сплавов из системы $Fe-Ti$. Это наглядно демонстрирует изотермическое сечение тройной системы $B-Fe-Ti$ (см. рис. 1).

Рис. 1. Изотермические сечения тройной системы $B-Fe-Ti$ при 1000°C [10, 11].

На стороне изотермического треугольника $Fe-Ti$ образуются только бинарные твердые растворы на основе $(\alpha-, \delta-Fe)$ и $(\beta-Ti)$, соединения $FeTi$ (прототип FeB) и $TiFe_2$. Бинарная система $B-Ti$ характеризуется наличием следующих соединений: TiB , TiB_2 и Ti_2B_5 [12]. В системе $Fe-B$ образуется два стабильных соединения: Fe_2B и FeB [12] и большое количество метастабильных фаз, формирующихся при охлаждении с высокими скоростями ($\sim 10^6^\circ\text{C}/\text{с}$) сплавов из жидкого состояния. К таким соединениям относят $Fe_{23}B_6$ с кубической решеткой (символ Пирсона $cF116$, пространственная группа $Fm\bar{3}m$, прототип $Cr_{23}C_6$, $a=1,069$ нм) [13], фазу с ромбической структурой ($a=0,6726$ нм, $b=0,4311$ нм, $c=0,5468$ нм), фазу с тетрагональной объемно-центрированной структурой ($a=0,862$ нм, $c=0,4270$ нм) [12], фазу Fe_3B , которая имеет две модификации: высокотемпературную со структурой типа $(tI32, I\bar{4}, Fe_3P, a=0,8655$ нм, $c=0,4297$ нм) и низкотемпературную со структурой типа $Fe_3P_{0,37}B_{0,63}$ ($tP32, P4_2/n, Ti_3P, a=0,8646$ нм, $c=0,4314$ нм) [12].

В системе $B-Cr-Fe$ внутри изотермического треугольника существуют четыре соединения с протяженными и узкими областями гомогенности: $B(Cr_{1-x}, Fe_x)$, $B(Fe_{1-x}, Cr_x)$, $(Cr_{1-x}, Fe_x)_2B$ и $(Fe_{1-x}, Cr_x)_2B$, которые образуются на сторонах изотермического треугольника $B-Cr$ и $B-Fe$ (см. рис. 2). Как и в случае системы $B-Fe-Ti$, бор подавляет образование

тройных соединений на основе сплавов $Cr-Fe$. Это наглядно видно на изотермическом сечении тройной системы $B-Cr-Fe$ (см. рис. 2). На стороне изотермического треугольника $Cr-Fe$ образуются только бинарные твердые растворы на основе $(\alpha-Fe)$ и $(\alpha-Cr)$ и соединение $\sigma-FeCr$ [12]. Бинарная система $Cr-B$ характеризуется наличием пяти соединений: CrB_2 , Cr_6B_3 , CrB , Cr_3B_4 , Cr_2B . Соединения CrB и CrB_2 плавятся конгруэнтно соответственно при ~ 2100 и $\sim 2200^\circ C$. Соединения Cr_2B , Cr_5B_3 и Cr_3B_4 образуются по перитектическим реакциям соответственно при температурах 1870 , ~ 1900 и $2070^\circ C$. Для этой системы характерно наличие трех эвтектических реакций: $Ж \leftrightarrow (Cr) + (Cr_2B)$, $Ж \leftrightarrow (CrB) + (Cr_3B_4)$ и $Ж \leftrightarrow (CrB_2) + (B)$ протекают соответственно при температурах 1620 , 2050 и $1830^\circ C$. Соединение CrB_2 имеет орторомбическую решетку типа Mn_4B (символ Пирсона $oF48$, пространственная группа $Fddd$, $a=1,476$ нм, $b=0,7428$ нм, $c=0,4287$ нм), Cr_6B_3 – тетрагональную ($a=0,548$ нм, $c=1,010$ нм), CrB имеет высокотемпературную ($T \geq 2095-1000^\circ C$, $oC8$, $Cmcm$, $a=0,29685$ нм, $b=0,75587$ нм, $c=0,2928$ нм) и низкотемпературную ($T < 1000^\circ C$, $tI16$, $I4_1/amd$, $a=2,9493$ нм, $c=1,5728$ нм) модификации, Cr_5B_3 – тетрагональную решетку (символ Пирсона $tI32$, пространственная группа $I4/mcm$, $a=0,54640$ нм, $c=1,0110$ нм), Cr_3B_4 – орторомбическую решетку (символ Пирсона $oI14$, пространственная группа $Immm$, $a=0,2988$ нм, $b=1,301$ нм, $c=0,2949$ нм), CrB_2 – тетрагональную (символ Пирсона hP_3 , пространственная группа Pb/mmm , $a=0,2972$ нм, $c=0,3066$ нм) [12].

Изотермическое сечение тройной системы $Cr-Fe-Ti$ при температуре $800^\circ C$ приведено на рис. 3. В этой системе хорошо проявляются две области трехкомпонентного твердого раствора на основе разупорядоченной ОЦК решетки: $\alpha(Cr, Fe, Ti)$. Одна из этих областей имеет протяженную область гомогенности вдоль всей стороны $Fe-Cr$ изотермического треугольника с небольшим включением в нее трехкомпонентной фазы на основе $\sigma(Cr, Fe)$. Другая значительная по площади область гомогенности трехкомпонентного твердого раствора находится в титановом угле изотермического треугольника. Также существует протяженная область гомогенности трехкомпонентного соединения $Ti(Fe_{1-x}Cr_x)_2$ на основе соединения $TiFe_2$ (фаза Лавеса λ_1 со структурой $C14$, символ Пирсона $hP12$, пространственная группа $P6_3/mmc$). В то же время область гомогенности трехкомпонентного соединения на основе фазы $TiCr_2$ (фаза Лавеса λ_2 со структурой $C15$, символ Пирсона $cF24$, пространственная группа $Fd\bar{3}m$) очень незначительна.

Рис. 2. Изотермические сечения тройной системы $B-Cr-Fe$ при $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ [15, 16].

Рис. 3. Изотермические сечения тройной системы $Cr-Fe-Ti$ при $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ [17].

Установлено только одно трехкомпонентное соединение внутри изотермического треугольника, а именно, τ -фаза в области стехиометрического состава $Ti_5Cr_7Fe_{17}$. Область гомогенности τ -фазы занимает небольшую площадь в изотермическом треугольнике (см. рис. 3). Отметим, что в жидком состоянии Cr и Ti неограниченно растворимы друг в друге. При понижении температуры сплавы

кристаллизуются с образованием непрерывного ряда твердых растворов $\beta\text{-Ti,Cr}$). Основные структурные превращения происходят в твердом состоянии. В области состава TiCr_2 образуются фазы со структурой фаз Лавеса λ_2 .

Рис. 4. Структура поверхностного объема стали 12X18H10T после комплексной обработки; а – слой, расположенный на глубине ~ 2 мкм; б – ~ 15 мкм; в – ~ 30 мкм; г – ~ 50 мкм.

Высокотемпературная модификация $\gamma\text{-TiCr}_2$ образуется конгруэнтно из $(\beta\text{-Ti,Cr})$ при 1370°C . При температурах ниже $1270\div 1275^\circ\text{C}$ происходит структурный переход $\gamma\text{-TiCr}_2 \leftrightarrow \beta\text{-TiCr}_2$. Интервал гомогенности фазы $\beta\text{-TiCr}_2$ составляет $64\div 66$ ат.% Cr при температуре 1220°C .

Низкотемпературная модификация $\alpha\text{-TiCr}_2$ образуется по перитектоидной реакции из $\beta\text{-TiCr}_2$ и $(\beta\text{-Ti, Cr})$ при температуре $\sim 1220^\circ\text{C}$ [12].

Фазовый состав поверхностных сплавов, сформированных при обработке стали 12X18H10T комбинированным способом, изучали методами рентгеноструктурного анализа. Показано, что в результате комплексной обработки в поверхностном слое стали образуется многофазная структура, основными фазами которой являются TiB , TiB_2 , TiFe_2 , TiCr_2 , $\text{Ti}_{0,95}\text{Cr}_{0,05}$, $\text{Ti}_{0,8}\text{Cr}_{0,2}$, $\text{Ti}_{0,75}\text{Fe}_{0,25}$ и $\gamma\text{-Fe}$.

Дефектную субструктуру стали, фазовый и элементный состав анализировали методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии тонких фольг. Фольги готовили методом ионного утонения пластинок, вырезанных перпендикулярно поверхности модифицирования. Такое расположение фольги позволяет анализировать состояние материала на различном контролируемом расстоянии от поверхности образца. Характерное изображение структуры стали, формирующейся на различном расстоянии от поверхности обработки, приведено на рис. 4. Как и следовало ожидать, в результате комплексной обработки, характеризующейся сверхвысокими (до $10^6^\circ\text{C}/\text{с}$) скоростями охлаждения, формируется субмикро- нанокристаллическая структура, размеры кристаллитов которой изменяются в пределах от десятков до сотен нанометром. Толщина модифицированного слоя достигает 60 мкм.

4. Заключение

Проведена комплексная обработка поверхности нержавеющей высокохромистой стали марки 12X18H10T. Показано, что насыщение поверхностного слоя стали титаном и бором с последующим высокоскоростным охлаждением в результате отвода тепла в интегрально холодный объем образца приводит к формированию многофазной субмикро- нанокристаллической структуры в слое толщиной до 60 мкм, содержащей бориды титана.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 19-19-00183).

Библиографический список

1. **Ворошнин, Л.Г.** Борирование промышленных сталей и чугунов / Л.Г. Ворошнин. – Минск: Беларусь, 1981. – 205 с.
2. **Самсонов, Г.В.** Бор, его соединения и сплавы / Г.В. Самсонов, Л.Я. Марковский, А.Ф. Жигач и др. Киев: АН УССР, 1960. – 590 с.
3. **Клопотов, А.А.** Термодинамический анализ фазообразования в нержавеющей стали, обработанной высокоинтенсивным импульсным электронным пучком / А.А. Клопотов,

- Ю.Ф. Иванов, В.А. Власов, А.И. Потекаев // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2016. – Вып. 8. – С. 155-163.
4. **Клопотов, А.А.** Образование МАХ-фаз электронно-ионно-плазменными методами / А.А. Клопотов, Ю.Ф. Иванов, А.Д. Тересов, Е.С. Марченко, В.Д. Клопотов // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2017. – Вып. 9. – С. 236-245.
5. **Гальченко, Н.К.** Структура и триботехнические свойства боридных покрытий, полученных электронно-лучевой наплавкой / Н.К. Гальченко, С.И. Белюк, К.А. Колесникова и др. // Физическая мезомеханика. – 2005. – Т. 8. – Специальный выпуск. – С. 133-136.
6. Марочник сталей и сплавов. – 4-е изд., переработ. и доп. / Ю.Г. Драгунов, А.С. Зубченко, Ю.В. Каширский и др.; под общ. ред. Ю.Г. Драгунова и А.С. Зубченко. – М.: Машиностроение, 2014. – 1216 с.
7. **Багаутдинов, А.Я.** Физические основы электровзрывного легирования металлов и сплавов / А.Я. Багаутдинов, Е.А. Будовских, Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов. – Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2007. – 301 с.
8. **Devyatkov, V.N.** Generation and propagation of high-current low-energy electron beams / V.N. Devyatkov, N.N. Koval, P.M. Schanin и др. // Laser and Particle Beams. – 2003. – V. 21. – I. 2. – P. 243-248.
9. Эволюция структуры поверхностного слоя стали, подвергнутой электронно-ионно-плазменным методам обработки / Ю.А. Денисова, Ю.Ф. Иванов, О.В. Иванова и др.; под общ. ред. Н.Н. Коваля и Ю.Ф. Иванова. – Томск: НТЛ, 2016. – 304 с.
10. **Федоров, Т.Ф.** Система титан-железо-бор / Т.Ф. Федоров, Ю.Б. Кузьма // Известия АН СССР. Неорганические Материалы. – 1967. – Т. 3. – № 5. – С. 1498-1499.
11. **Tanaka, K.** Phase equilibria in TiB_2 -reinforced high modulus steel / K. Tanaka, T. Saito // Journal of Phase Equilibria. – 1999. – V. 20. – I. 3. – P. 207-214.
12. **Лякишев, Н.П.** Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник: В 3 т. / Н.П. Лякишев, О.А. Банных, Л.Л. Рохлин и др.; под общей редакцией Н.П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1996. – Т. 1. – 992 с.; 1997. – Т. 2. – 1024 с.; 2000 – Т. 3. – Книга 2. – 448 с.; 2001. – Т. 3. – Книга 1. – 872 с.
13. **Khan, Y.** Formation of the τ -phase in the $Fe-B$ alloys / Y. Khan, H. Wibbeke // Zeitschrift für Metallkunde. – 1991. – Bd. 82. – H. 9. – S. 703-705.
14. **Rogl, P.** The system $B-N-Fe$. In book: Phase diagrams of ternary boron nitride and silicon nitride systems / P. Rogl, J.C. Schuster. – Metals Park, Ohio: ASM International, 1992. – P. 33-36.
15. **Чепига, М.В.** Равновесие фаз в системе железо-бор-хром / М.В. Чепига, Ю.Б. Кузьма // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1970. – №3. – С. 127-130.
16. **Kaneko, H.** Borides in stainless steel / H. Kaneko, T. Nishizawa, A. Chiba // Journal of the Japan Institute of Metals. – 1966. – V. 30. – I. 2. – P. 157-163.
17. **Raghavan, V.** The $Cr-Fe-Ti$ (Chromium-Iron-Titanium) system. In book: Phase diagrams of ternary iron alloys. Part 1 / V. Raghavan. – Metals Park, Ohio: ASM International; – Delhi: Indian Institute of Technology, 1987. – V. 1. – P. 43-54.

References

1. **Voroshnin, L.G.** Boroning of industrial steels and cast irons / L.G. Voroshnin. – Minsk: Belarus, 1981. – 205 p. (In Russian).

2. **Samsonov, G.V.** Boron, its compounds and alloys / G.V. Samsonov, L.Ya. Markovskij, A.F. Zhigach et al. Kiev: AN USSR, 1960. – 590 p. (In Russian).
3. **Klopotov, A.A.** Thermodynamic analysis of phase formation in stainless steel treated with a high-intensity pulsed electron beam / A.A. Klopotov, Yu.F. Ivanov, V.A. Vlasov, A.I. Potekaev // Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials – 2016. – Vyp. 8. – P. 155-163. (In Russian).
4. **Klopotov, A.A.** Formation of MAX-phases by electronically-ion-plasma methods / A.A. Klopotov, Yu.F. Ivanov, A.D. Teresov, E.S. Marchenko, V.D. Klopotov // Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials. – 2017. – Vyp. 9. – P. 236-245. (In Russian).
5. **Gal'chenko, N.K.** Structure and tribological properties of boride coatings obtained by electron beam welding / N.K. Gal'chenko, S.I. Belyuk, K.A. Kolesnikova et al. // Fizicheskaya mezhmekhanika. – 2005. – V. 8. – Spetsial'nyj vypusk. – P. 133-136. (In Russian).
6. Grade guide of steels and alloys. – 4-e izd., pererabot. i dop. / Yu.G. Dragunov, A.S. Zubchenko, Yu.V. Kashirskij et al.; pod obshch. red. Yu.G. Dragunova i A.S. Zubchenko. – M.: Mashinostroenie, 2014. – 1216 p. (In Russian).
7. **Bagautdinov, A.Ya.** Physical fundamentals of electric explosive alloying of metals and alloys / A.Ya. Bagautdinov, E.A. Budovskikh, Yu.F. Ivanov, V.E. Gromov. – Novokuznetsk: Izd-vo SibGIU, 2007. – 301 p. (In Russian).
8. **Devyatkov, V.N.** Generation and propagation of high-current low-energy electron beams / V.N. Devyatkov, N.N. Koval, P.M. Schanin и др. // Laser and Particle Beams. – 2003. – V. 21. – I. 2. – P. 243-248.
9. The evolution of the structure of the surface layer of steel subjected to electron-ion-plasma processing methods / Yu.A. Denisova, Yu.F. Ivanov, O.V. Ivanova et al.; pod obshch. red. N.N. Kovalya i Yu.F. Ivanova. – Tomsk: NTL, 2016. – 304 p. (In Russian).
10. **Fedorov, T.F.** Titanium-iron-boron system / T.F. Fedorov, Yu.B. Kuz'ma // Izvestiya AN SSSR. Neorganicheskie Materialy. – 1967. – V. 3. – № 5. – P. 1498-1499. (In Russian).
11. **Tanaka, K.** Phase equilibria in TiB_2 -reinforced high modulus steel / K. Tanaka, T. Saito // Journal of Phase Equilibria. – 1999. – V. 20. – I. 3. – P. 207-214.
12. **Lyakishev, N.P.** State diagrams of double metal systems: Handbook: In 3 vol. / N.P. Lyakishev, O.A. Bannykh, L.L. Rokhlin et al.; pod obshchej redaktsiej N.P. Lyakisheva. – M.: Mashinostroenie, 1996. – V. 1. – 992 p.; 1997. – V. 2. – 1024 p.; 2000 – V. 3. – Kniga 2. – 448 p.; 2001. – V. 3. – Kniga 1. – 872 p. (In Russian).
13. **Khan, Y.** Formation of the τ -phase in the $Fe-B$ alloys / Y. Khan, H. Wibbeke // Zeitschrift für Metallkunde. – 1991. – Bd. 82. – H. 9. – S. 703-705.
14. **Rogl, P.** The system $B-N-Fe$. In book: Phase diagrams of ternary boron nitride and silicon nitride systems / P. Rogl, J.C. Schuster. – Metals Park, Ohio: ASM International, 1992. – P. 33-36.
15. **Chepiga, M.V.** Phase equilibrium in the iron-boron-chromium system / M.V. Chepiga, Yu.B. Kuz'ma // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Chernaya metallurgiya. – 1970. – №3. – P. 127-130. (In Russian).
16. **Kaneko, H.** Borides in stainless steel / H. Kaneko, T. Nishizawa, A. Chiba // Journal of the Japan Institute of Metals. – 1966. – V. 30. – I. 2. – P. 157-163.
17. **Raghavan, V.** The $Cr-Fe-Ti$ (Chromium-Iron-Titanium) system. In book: Phase diagrams of ternary iron alloys. Part 1 / V. Raghavan. – Metals Park, Ohio: ASM International; – Delhi: Indian Institute of Technology, 1987. – V. 1. – P. 43-54.

Original paper

SATURATION OF THE STEAL SURFACE BY TITANIUM AND BORON ELECTRON-ION-PLASMA METHOD: PHASE-STRUCTURAL COMPOSITION

A.A. Klopotov¹, Yu.F. Ivanov², E.A. Petrikova², A.D. Teresov², O.S. Tolkachev², O.G. Volokitin¹,
V.D. Klopotov³

¹*Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia*

²*Institute of High Current Electronics SB RAS, Tomsk, Russia*

³*National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia*

DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.605

Abstract: The analysis of diagrams of the state of the $Fe-B-Ti$, $Fe-Cr-B$ and $Fe-Cr-Ti$ systems is carried out, describing the phase converting into high-chromium stainless steel of 12Cr18Ni10Ti (AISI 321) alloyed by titanium and boron. It is shown that in the conditions of the high-speed tempering realized at the electro-explosive alloying by titanium and boron and irradiation by an intensive pulsed electronic beam, compounds from two elements are formed in the steel only.

Keywords: *austenitic steel, titanium, boron, state diagram, intense pulsed electron beam, electric explosive alloying, phase composition, defective substructure.*

Клопотов Анатолий Анатольевич – д.ф.-м.н., профессор кафедры прикладной механики и материаловедения, ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет»
Иванов Юрий Федорович – д.ф.-м.н., главный научный сотрудник лаборатории плазменной эмиссионной электроники, ФГБУН «Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН»

Петрикова Елизавета Алексеевна – младший научный сотрудник лаборатории плазменной эмиссионной электроники, ФГБУН «Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН»

Тересов Антон Дмитриевич – научный сотрудник лаборатории плазменной эмиссионной электроники, ФГБУН «Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН»

Толкачев Олег Сергеевич – младший научный сотрудник лаборатории плазменной эмиссионной электроники, ФГБУН «Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН»

Волокитин Олег Геннадиевич – д.ф.-м.н., профессор кафедры прикладной механики и материаловедения, ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет»

Клопотов Владимир Дмитриевич – к.т.н., доцент кафедры высшей математики ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Anatolii A. Klopotov – Dr. Sc., Professor of the Department of Applied Mechanics and Materials Science, Tomsk State University of Architecture and Building

Yury F. Ivanov – Dr. Sc., Chief Researcher of the Laboratory of Plasma Emission Electronics, Institute of High Current Electronics SB RAS

Elizaveta A. Petrikova – Junior Researcher of the Laboratory of Plasma Emission Electronics, Institute of High Current Electronics SB RAS

Anton D. Teresov – Researcher of the Laboratory of Plasma Emission Electronics, Institute of High Current Electronics SB RAS

Oleg S. Tolkachev – Junior Researcher of the Laboratory of Plasma Emission Electronics, Institute of High Current Electronics SB RAS

Oleg G. Volokitin – Dr. Sc., Full Professor of the Department of Applied Mechanics and Materials Science, Tomsk State University of Architecture and Building

Vladimir D. Klopotov – Docent of Mathematics Department, National Research Tomsk Polytechnic University

Поступила в редакцию/received: 15.09.2019; после рецензирования/revised: 17.10.2019; принята/accepted 04.11.2019.