



УДК 669.1.017:669.018.44:669.018.891:539.25

*С.Ю. Кондратьев, А.В. Пташник,
Г.П. Анастасиади, С.Н. Петров*

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ ФАЗ В ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВАХ Х25Н35

*S.Yu. Kondrat'ev, A.V. Ptashnik,
G.P. Anastasiadi, S.N. Petrov*

QUANTITATIVE ASSESSMENT OF THE CONTENT OF PHASES IN HEAT RESISTING ALLOYS Cr25Ni35

Рассмотрен метод определения количественного содержания дисперсных включений упрочняющих фаз в жаропрочных сплавах системы 25Cr–35Ni–C–Si–Nb с использованием электронной микроскопии. Метод успешно опробован для сплава 0,45C–26Cr–33Ni–2Si–2Nb. Представлены экспериментальные кривые содержания карбидов хрома и ниобия в структуре сплава после высокотемпературной выдержки при 1150 °С различной длительности.

ЛИТЫЕ ЖАРОПРОЧНЫЕ СПЛАВЫ; МИКРОСТРУКТУРА; ФАЗОВЫЙ СОСТАВ; ЭЛЕКТРОННАЯ МИКРОСКОПИЯ.

The method of calculation of the quantitative content of disperse inclusions of strengthening phases with use electron microscopy in heat resisting alloys of 25Cr–35Ni–C–Si–Nb system is considered. The method with advantage is tested for an alloy 0.45C–26Cr–33Ni–2Si–2Nb. Experimental curve contents of chromium and niobium carbides in alloy structure after high-temperature endurance of various duration at 1150 °C are submitted.

CAST HEAT RESISTANT ALLOYS; MICROSTRUCTURE; PHASE COMPOSITION; ELECTRON MICROSCOPY.

Для изготовления оборудования нефтехимических и нефтеперерабатывающих предприятий широко применяют жаропрочные жаростойкие сплавы систем Х25Н35 (НР type) [1–3]. Рабочие температуры таких установок достигают 1100–1200 °С. Известно, что эксплуатационные свойства жаропрочных сплавов при этих температурах определяются наличием упрочняющей сетки дисперсных выделений карбидного или интерметаллидного типа [4–5]. Исследования последних лет показали, что характер распределения и количественное соотношение упрочняющих фаз в сплавах рассматриваемой группы существенно изменяются в процессе высокотемпературной выдержки [6–12]. Таким образом, для надежного прогнозирования работоспособности рассматриваемых сплавов на основе системы Fe–Cr–Ni необходимы достоверные количественные методики исследования

изменения объемной доли и элементного состава дисперсных выделений определенного типа в зависимости от длительности температурного воздействия.

Цель нашей работы — разработка и апробация методики количественной оценки объемного содержания, морфологии и состава дисперсных фаз в жаростойких жаропрочных сплавах Х25Н35.

Материал и методика эксперимента

Для количественного фазового анализа жаропрочных сплавов с дисперсным упрочнением в качестве базового выбран известный метод количественной оценки размера, объемной доли, состава и морфологических особенностей строения неметаллических включений в металлических материалах. Метод основан на совместном использовании данных рентгеноспек-

трального микроанализа и цифровой обработки электронно-микроскопических изображений структуры сплавов. В данной работе метод модифицирован для исследования дисперсных фаз в жаропрочных жаростойких сплавах на Fe-Cr-Ni-основе.

Для количественного металлографического анализа применяли программу Clemex Vision PE. Программа обеспечивает полный цикл работы с металлографическими изображениями, а именно:

ввод и обработку изображений; калибровку по размеру;

количественные оценки и анализ изображений структур по ГОСТ-ам с формированием протоколов и отчетов; количественные оценки и анализ структур по любым требуемым нормам;

надежность работы, точность результатов, эффективность и удобство, благодаря эргономичному, простому и понятному интерфейсу;

автоматизацию рутинных операций обработки и анализа изображений;

наглядный количественный анализ;

возможность создания отчетов с оригинальными изображениями и таблицами результатов измерений.

Для выявления структуры сплава применяли электролитическое травление в десятипроцентной щавелевой кислоте. Изготовление и подготовку шлифов выполняли на оборудовании фирмы «Buehler» согласно стандарту ASTM E 3–95. Структуру сплава исследовали с использованием растрового электронного микроскопа Quanta 200 3D FEG. Для морфологических исследований дисперсных включений фаз в модельном сплаве использовали изображения структур, полученные при проведении микрорентгеноспектральных исследований на растровом электронном микроскопе Tescan VEGA 5136 LM.

Для проверки разработанного метода количественного фазового анализа в качестве модельного выбран жаростойкий жаропрочный сплав 0,45C–26Cr–33Ni–2Si–2Nb, используемый для изготовления радиантных змеевиков высокотемпературных установок пиролиза [4]. Сплав выплавляли в индукционной печи емкостью 100 кг на чистых шихтовых материалах и разливали в песчаные формы — стандартные клиновые литейные пробы (ГОСТ 977–88).

Фактический химический состав, % масс., исследованного сплава 0,45C–26Cr–33Ni–2Si–2Nb следующий:

| | |
|---------|------|
| C..... | 0,46 |
| Si..... | 1,73 |
| Mn..... | 1,31 |
| Cr..... | 25,5 |
| Ni..... | 35,6 |
| Nb..... | 1,60 |
| W..... | 0,59 |
| Mo..... | 0,31 |
| Ti..... | 0,21 |
| N..... | 0,05 |
| Fe..... | Ост. |

При исследовании сплава разработанным методом оценивали количественное изменение объемной доли, состава и морфологии дисперсных выделений в структуре.

Результаты экспериментальных исследований

Принцип разработанного метода количественного определения фазового состава жаропрочных сплавов X25H35 заключается в следующем. Растровый электронный микроскоп сканирует поле образца, на котором приготовлен микрошлиф и травлением выявлена микроструктура. При этом происходит накопление электронного изображения. В случае использования методики получения изображения от плоской поверхности шлифа в режиме обратно отраженных электронов контраст изображения определяется исключительно средним атомным номером облучаемого участка образца. Формируется так называемый Z-контраст. Изображение, полученное с помощью этого контраста, позволяет анализировать структуру, содержащую дисперсные выделения, и несет информацию о локальном элементном составе. Это дает возможность выбирать участки для количественного элементного анализа с помощью рентгеновского спектрометра. По заданному контрасту на изображении микроструктуры происходит выделение частиц предустановленной яркости (рис. 1).

На следующем этапе количественного анализа фазового состава сплава электронный зонд сканирует участок поверхности в рамках контура каждой обнаруженной и выделенной соответствующим контрастом частицы в структуре. При этом определение элементного состава происходит только в области выделенной частицы (рис. 2).

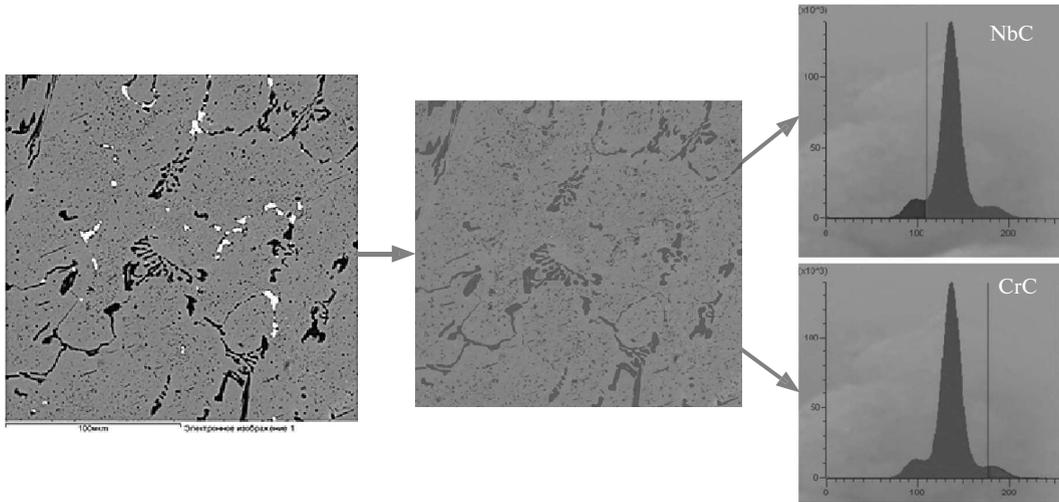


Рис. 1. Схематическое изображение последовательности получения контрастного изображения различных фаз в структуре многофазного сплава

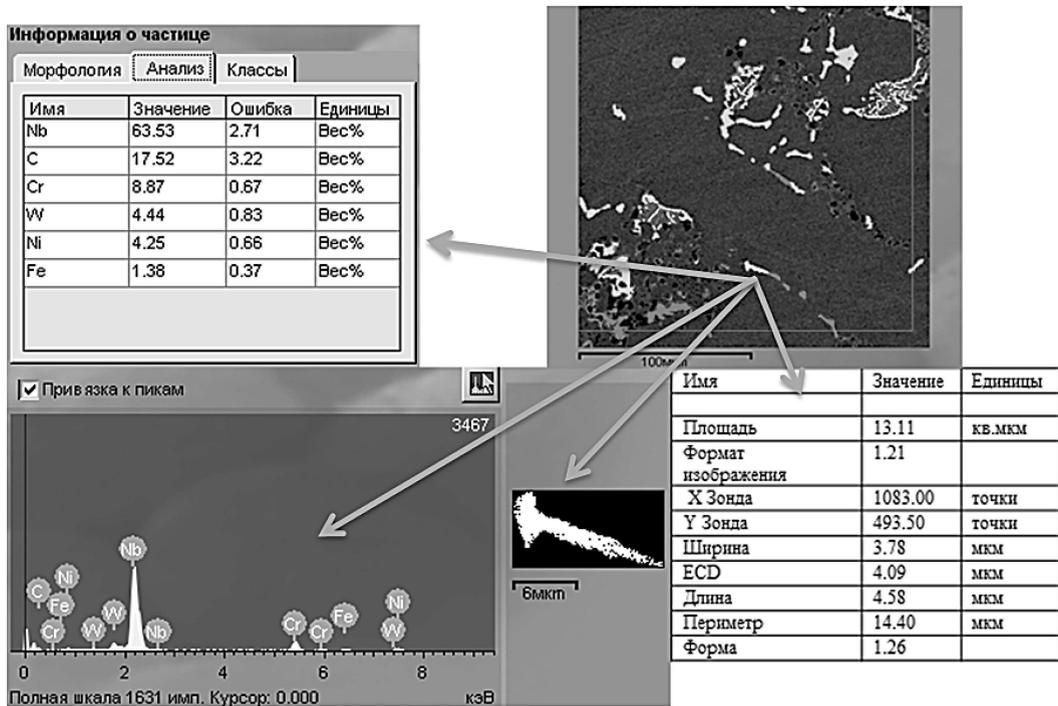


Рис. 2. Схема выполнения количественного анализа морфологии и химического состава частицы фазы в структуре сплава

Результаты сканирования заносятся в базу данных, где для каждой частицы фиксируются морфологические параметры (длина, ширина, площадь и т. д.), химический состав и характеристический рентгеновский спектр. Полученные количественные базы экспериментальных

данных позволяют проводить сортировку частиц по составу и морфологическим признакам, строить графические изображения распределения частиц по размерам и другим признакам, определять объемную долю частиц каждой фазы. Благодаря автоматизированному управлению

зондом и столиком перемещения образца при сканировании структуры сплава с использованием электронного микроскопа можно проанализировать большое количество полей при достаточно большом увеличении (от сотен до нескольких тысяч крат) и обеспечить получение представительных результатов исследования.

На основе определения элементного состава дисперсных частиц в структуре сплава выявляют, каким фазам соответствует каждый контраст. При этом, дисперсные частицы в структуре сплава выделяют различным цветом с помощью функции тональной коррекции с использованием шкалы распределения яркости в программе Clemex Vision PE (см. рис. 2). Для каждого изображения структуры автоматически выводится распределение яркости и на нем выделяются интервалы, соответствующие яркости каждой фазы. В результате получается многоцветное изображение структуры сплава, содержащего дисперсные фазы различного химического состава.

Металлографический анализ сплава $0,45\text{C}-26\text{Cr}-33\text{Ni}-2\text{Si}-2\text{Nb}$ показал, что его микроструктура в литом состоянии представляет собой γ -твердый раствор (аустенит) и значительное количество избыточных фаз (рис. 3, а). Микрорентгеноспектральным анализом выявлено, что избыточные фазы представляют собой карбиды хрома Cr_mC_n (эвтектические и изолированные) и карбиды ниобия NbC (внутри которых могут присутствовать нитриды титана, являвшиеся за-

родышами твердой фазы при кристаллизации сплава).

Таким образом, упрочняющими фазами, в основном определяющими высокотемпературную работоспособность исследуемого сплава, являются карбиды хрома и ниобия. В то же время известно [7, 8, 10–12], что в процессе эксплуатации сплава при температурах $1100-1200^\circ\text{C}$ эти фазы непрерывно претерпевают фазовые превращения, в результате которых их объемная доля в структуре изменяется. Поэтому важно количественное определение содержания карбидов хрома и ниобия в структуре сплава после высокотемпературной выдержки для оценки степени его разупрочнения при длительной эксплуатации. Такое исследование было выполнено с использованием разработанного метода количественной оценки фазового состава сплавов, содержащих в структуре дисперсные включения различных фаз.

При обработке изображения структуры сплава $0,45\text{C}-26\text{Cr}-33\text{Ni}-2\text{Si}-2\text{Nb}$ синий цвет был присвоен карбидам хрома, красный — карбидам ниобия (рис. 3, б). Следующим этапом было удаление шумов на изображениях с помощью программных фильтров. После такой обработки изображения программа определяет отдельную частицу фазы как замкнутый контур, образованный пикселями одного цвета, и с помощью математических методов для каждой выявленной частицы рассчитывает морфологические параметры: объемную долю, площадь, приведенный

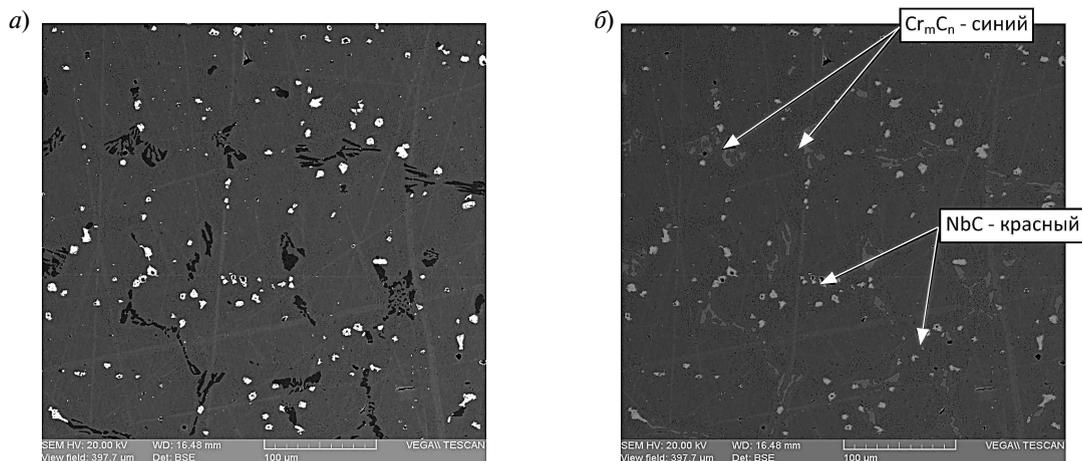


Рис. 3. Микроструктура сплава $0,45\text{C}-26\text{Cr}-33\text{Ni}-2\text{Si}-2\text{Nb}$ после выдержки при 1150°C , 100 ч (РЭМ). Вид изображения: а — исходный, б — после контрастирования и цветного окрашивания

диаметр, коэффициент формы и т. д. Полученные результаты для каждой частицы каждой фазы заносятся в базу данных.

Для сплава $0,45\text{C}-26\text{Cr}-33\text{Ni}-2\text{Si}-2\text{Nb}$ с помощью программ Clemex Vision PE и Microsoft Office Excel разработанным методом были выполнены расчеты объемной доли дисперсных частиц карбидов хрома и ниобия и построены зависимости содержания фаз в структуре от длительности выдержки при 1150°C — температуре эксплуатации установок пиролиза (рис. 4). Из полученных данных следует, что в процессе высокотемпературной эксплуатации длительно-стью до 100 ч в структуре сплава увеличивается объемная доля карбидов хрома и уменьшается доля карбидов ниобия. При этом зависимость количества фазы Cr_mC_n в структуре сплава имеет линейный характер, а фазы NbC — представляет собой кривую с максимумом.

Характер установленной зависимости фазового состава сплава от длительности выдержки при 1150°C (рис. 4) согласуется с предложенным в [10–13] механизмом трансформации структуры сплавов X25H35 при длительной высокотемпературной эксплуатации. Структура литых жаропрочных жаростойких сплавов, близких по составу сплаву $0,45\text{C}-26\text{Cr}-33\text{Ni}-2\text{Si}-2\text{Nb}$, характеризуется высокой термодинамической нестабильностью и в процессе их эксплуатации при температурах $1100-1200^\circ\text{C}$ непрерывно претерпевает фазовые превращения. При этом химический состав матричного твердого раствора на $\text{Fe}-\text{Cr}-\text{Ni}$ основе практически не изменяется. Диффузионное перераспределение химических элементов в структуре таких сплавов приводит к образованию новых фаз и растворению исходных и новых фаз в адаптирующемся режиме, который характеризуется установлением условного динамического структурного «равновесия». Вследствие этого в сплаве $0,45\text{C}-26\text{Cr}-33\text{Ni}-2\text{Si}-2\text{Nb}$ в процессе выдержки при 1150°C длительно-стью 100 ч происходит увеличение доли карбидов от неравновесного количества в литом состоянии до близкого к расчетному значению — в соответствии с балансом химических компонентов, составляющих сплав. Так, содержание карбидов хрома в структуре сплава увеличивается от 3,1 % объем. в литом состоянии до 4,3 % после 100 часов высокотемпературной выдержки. Содержание карбидов нио-

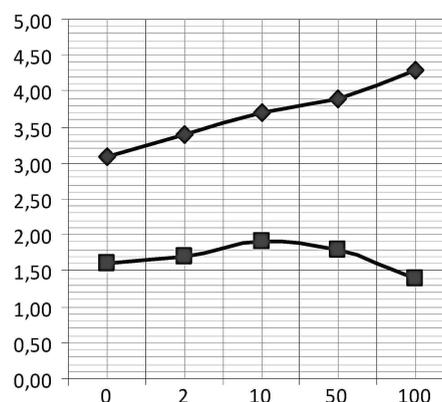


Рис. 4. Зависимости количества карбидов хрома и ниобия в структуре сплава $0,45\text{C}-26\text{Cr}-33\text{Ni}-2\text{Si}-2\text{Nb}$ от длительности выдержки при 1150°C

(—◆— — карбид хрома; —■— — карбид ниобия)

бия в структуре литого сплава составляет 1,6 % объем., а после выдержки длительно-стью 10 ч возрастает до 1,9 %. При увеличении длительности высокотемпературной выдержки более 10 ч в отличие от карбидов хрома количество карбидов ниобия в структуре сплава уменьшается и после 100 ч составляет 1,4 %. Наблюдаемое уменьшение доли карбидов ниобия в структуре сплава при увеличении длительности выдержки объясняется частичным растворением этой фазы с образованием промежуточных интерметаллидных фаз и дисперсных карбидов хрома [6–9].

Разработан метод количественного определения содержания фаз в структуре жаропрочных жаростойких сплавов на $\text{Fe}-\text{Cr}-\text{Ni}$ -основе, характеризующихся наличием в структуре дисперсных включений фаз различного химического состава. Метод основан на совместном использовании данных рентгеноспектрального микроанализа и цифровой обработки электронно-микроскопических изображений структуры сплавов. Опробование разработанного метода применительно к сплаву серии X25H35 показало его высокую точность. По уровню представительности метод не уступает оптической металлографии, обеспечивая при этом получение количественной оценки размеров, химического состава и морфологических признаков дисперсных включений фаз в структуре сплавов.

Построены количественные зависимости изменения содержания карбидных фаз в структуре сплава 0,45C–26Cr–33Ni–2Si–2Nb в процессе длительной выдержки при температуре 1150 °С. Установлено, что при высокотемпературной выдержке неравновесное содержание карбидов хрома и ниобия в структуре литого сплава увеличивается до расчетных значений по балансу химических компонентов сплава: для $Cr_m C_n$ — примерно до 4 % объем. при 100 ч и для NbC — до

2 % объем. при 10 ч. Увеличение длительности выдержки более 10 ч приводит к уменьшению количества карбидов ниобия в структуре сплава вследствие частичного их растворения и образования промежуточных фаз различного состава.

Работа выполнена в Центре коллективного пользования ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» «Состав, структура и свойства функциональных и конструкционных материалов» при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Garbiak M., Jasinski W., Piekarski B. Materials for Reformer Furnace Tubes. History of Evolution // Archives Of Foundry Engineering. 2011. Vol. 11. Special Issue 2. P. 47–52.
2. De Almeida L.H., Ribeiro A.F., May I.L. Microstructural characterization of modified 25Cr-35Ni centrifugally cast steel furnace tubes // Materials Characterization. 2003. Vol. 49, № 3. P. 219–229.
3. Dewar M.P., Gerlich A.P. Correlation between experimental and calculated phase fractions in aged 20Cr32Ni1Nb austenitic stainless steels containing nitrogen // Metallurgical and Materials Transactions A. 2012. Vol. 13, № 4, April. Preprint submitted. 19 p.
4. Орыщенко А.С. Жаростойкие жаропрочные сплавы. СПб.: Наука, 2011. 191 с.
5. Рудской А.И., Орыщенко А.С., Кондратьев С.Ю., Анастасиади Г.П., Фукс М.Д., Петров С.Н. Особенности структуры и длительная прочность литого жаропрочного сплава 45X26H33C2B2 // Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov. 2013. № 4 (694). С. 42–47.
6. Орыщенко А.С., Кондратьев С.Ю., Анастасиади Г.П., Фукс М.Д., Петров С.Н. Особенности структурных изменений в жаропрочном сплаве 45X26H33C2B2 при температурах эксплуатации. Сообщение 1: Литое состояние // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия «Наука и образование». 2012. № 1 (142). С. 155–163.
7. Орыщенко А.С., Кондратьев С.Ю., Анастасиади Г.П., Фукс М.Д., Петров С.Н. Особенности структурных изменений в жаропрочном сплаве 45X26H33C2B2 при температурах эксплуатации. Сообщение 2: Влияние высокотемпературной выдержки // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия «Наука и образование». 2012. № 2(147), Т. 1. С. 217–228.
8. Рудской А.И., Анастасиади Г.П., Орыщенко А.С., Кондратьев С.Ю., Фукс М.Д. Особенности структурных изменений в жаропрочном сплаве 45X26H33C2B2 при температурах эксплуатации. Сообщение 3: Механизм и кинетика фазовых превращений // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия «Наука и образование». 2012. № 3(154), Т. 2. С. 143–150.
9. Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Анастасиади Г.П., Орыщенко А.С., Фукс М.Д., Петров С.Н. Трансформация структуры жаропрочного сплава 0,45C 26Cr 33Ni 2Si 2Nb при длительной высокотемпературной выдержке // Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov. 2013. № 10 (700). С. 7–14.
10. Рудской А.И., Орыщенко А.С., Кондратьев С.Ю., Анастасиади Г.П., Фукс М.Д. Механизм и кинетика фазовых превращений в жаропрочном сплаве 45X26H33C2B2 при длительных высокотемпературных выдержках. Часть 1 // Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov. 2014. № 1 (703). С. 3–8.
11. Рудской А.И., Анастасиади Г.П., Кондратьев С.Ю., Орыщенко А.С., Фукс М.Д. Влияние фактора числа электронных вакансий на кинетику образования, роста и растворения фаз при длительных высокотемпературных выдержках жаропрочного сплава 0.45C-26Cr-33Ni-2Si-2Nb // Физика металлов и металловедение. 2014. Т. 115, № 1. С. 3–13.
12. Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Анастасиади Г.П., Орыщенко А.С., Фукс М.Д. Механизм и кинетика фазовых превращений в жаропрочном сплаве 45X26H33C2B2 при длительных высокотемпературных выдержках. Часть 2 // Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov. 2014. № 3 (705). С. 12–19.

REFERENCES

1. Garbiak M., Jasinski W., Piekarski B. Materials for Reformer Furnace Tubes. History of Evolution. *Archives Of Foundry Engineering*. 2011. Vol. 11. Special Issue 2. P. 47–52.
2. De Almeida L.H., Ribeiro A.F., May I.L. Microstructural characterization of modified 25Cr-35Ni centrifugally cast steel furnace tubes. *Materials Characterization*. 2003. Vol. 49, № 3. P. 219–229.

3. Dewar M.P., Gerlich A.P. Correlation between experimental and calculated phase fractions in aged 20Cr32Ni1Nb austenitic stainless steels containing nitrogen. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2012. Vol. 13. № 4. Preprint submitted. 19 p. (rus.)

4. Oryshchenko A.S. Zharostoykiye zharoprochnyye splavy. SPb.: Nauka, 2011. 191 s. (rus.)

5. Rudskoy A.I., Oryshchenko A.S., Kondratyev S.Yu., Anastasiadi G.P., Fuks M.D., Petrov S.N. Osobennosti struktury i dlitelnaya prochnost litogo zharoprochnogo splava 45Kh26N33S2B2. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov*. 2013. № 4 (694). S. 42–47. (rus.)

6. Oryshchenko A.S., Kondratyev S.Yu., Anastasiadi G.P., Fuks M.D., Petrov S.N. Osobennosti strukturykh izmeneniy v zharoprochnom splave 45Kh26N33S2B2 pri temperaturakh ekspluatatsii. Soobshcheniye 1: Litoye sostoyaniye. *Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti SPbGPU. Seriya «Nauka i obrazovaniye»*. 2012. № 1 (142). S. 155–163. (rus.)

7. Oryshchenko A.S., Kondratyev S.Yu., Anastasiadi G.P., Fuks M.D., Petrov S.N. Osobennosti strukturykh izmeneniy v zharoprochnom splave 45Kh26N33S2B2 pri temperaturakh ekspluatatsii. Soobshcheniye 2: Vliyaniye vysokotemperaturnoy vyderzhki. *Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti SPbGPU. Seriya «Nauka i obrazovaniye»*. 2012. № 2 (147). Vol. 1. S. 217–228. (rus.)

8. Rudskoy A.I., Anastasiadi G.P., Oryshchenko A.S., Kondratyev S.Yu., Fuks M.D. Osobennosti strukturykh izmeneniy v zharoprochnom splave 45Kh26N33S2B2 pri

temperaturakh ekspluatatsii. Soobshcheniye 3: Mekhanizm i kinetika fazovykh prevrashcheniy. *Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti SPbGPU. Seriya «Nauka i obrazovaniye»*. 2012. № 3. (154). Vol. 2. S. 143–150. (rus.)

9. Rudskoy A.I., Kondratyev S.Yu., Anastasiadi G.P., Oryshchenko A.S., Fuks M.D., Petrov S.N. Transformatsiya struktury zharoprochnogo splava 0,45C 26Cr 33Ni 2Si 2Nb pri dlitelnoy vysokotemperaturnoy vyderzhke. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov*. 2013. № 10 (700). S. 7–14. (rus.)

10. Rudskoy A.I., Oryshchenko A.S., Kondratyev S.Yu., Anastasiadi G.P., Fuks M.D. Mekhanizm i kinetika fazovykh prevrashcheniy v zharoprochnom splave 45Kh26N33S2B2 pri dlitelnykh vysokotemperaturnykh vyderzhkakh. Chast 1. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov*. 2014. № 1 (703). S. 3–8. (rus.)

11. Rudskoy A.I., Anastasiadi G.P., Kondratyev S.Yu., Oryshchenko A.S., Fuks M.D. Vliyaniye faktora chisla elektronnykh vakansiy na kinetiku obrazovaniya, rosta i rastvoreniya faz pri dlitelnykh vysokotemperaturnykh vyderzhkakh zharoprochnogo splava 0.45C-26Cr-33Ni-2Si-2Nb. *Fizika metallov i metallovedeniye*. 2014. T. 115. № 1. S. 3–13. (rus.)

12. Rudskoy A.I., Kondratyev S.Yu., Anastasiadi G.P., Oryshchenko A.S., Fuks M.D. Mekhanizm i kinetika fazovykh prevrashcheniy v zharoprochnom splave 45Kh26N33S2B2 pri dlitelnykh vysokotemperaturnykh vyderzhkakh. Chast 2. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov*. 2014. № 3 (705). S. 12–19. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КОНДРАТЬЕВ Сергей Юрьевич — доктор технических наук профессор кафедры технологии и исследований материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: petroprom2013@yandex.ru

ПТАШНИК Алина Вадимовна — инженер сектора электронной микроскопии ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей»; 191015, ул. Шпалерная, 49, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: alina_pv@mail.ru

АНАСТАСИАДИ Григорий Панеодович — доктор технических наук профессор кафедры технологии и исследований материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: anastas45@yandex.ru

ПЕТРОВ Сергей Николаевич — кандидат химических наук начальник сектора электронной микроскопии ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей»; 191015, ул. Шпалерная, 49, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: crism325@gmail.com

AUTHORS

KONDRAT'EV Sergey Yu. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: petroprom2013@yandex.ru

PTASHNIK Alina V. — FSUE Central Research Institute of Structural Materials «Prometey»; 191015, Shpaler-naya Str. 49, St. Petersburg, Russia; e-mail: alina_pv@mail.ru

ANASTASIADI Grigoriy P. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: anastas45@yandex.ru

PETROV Sergey N. — FSUE Central Research Institute of Structural Materials «Prometey»; 191015, Shpaler-naya Str. 49, St. Petersburg, Russia; e-mail: crism325@gmail.com