



УДК 669.14

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-10-5-5

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА
ДИФФУЗИОННОГО СЛОЯ ТЕПЛОСТОЙКОЙ СТАЛИ
ВКС10-У-Ш**

Р.М. Дворецков

Н.А. Курпякова

Н.А. Колмыкова

Ф.Н. Карачевцев

кандидат химических наук

Октябрь 2015

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

Р.М. Дворецков¹, Н.А. Курьякова¹, Н.А. Колмыкова¹, Ф.Н. Карачевцев¹

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА ДИФФУЗИОННОГО СЛОЯ ТЕПЛОСТОЙКОЙ СТАЛИ ВКС10-У-Ш

Изучен фазовый состав диффузионного слоя высокопрочной теплостойкой дисперсионно-твердеющей стали ВКС10-У-Ш, микролегированной редкоземельными элементами (РЗМ), после комплексной химико-термической обработки (ХТО), включающей вакуумную цементацию, упрочняющую термообработку (высокий отпуск, закалка, старение и ионно-плазменное азотирование). Исследования проводили методами физико-химического фазового анализа (ФХФА), дифракции отраженных электронов (ДОЭ) и растровой электронной микроскопии (РЭМ). Полученные разными методами данные позволили выяснить, какие легирующие элементы формируют фазовый состав стали, а также какие карбиды и нитриды придают ей необходимые свойства.

Ключевые слова: *теплостойкая сталь, фазовый анализ, изолирование фаз, ФХФА, РЭМ, МРСА, дифракция отраженных электронов, ДОЭ, карбиды, нитриды.*

R.M. Dvoretzskov, N.A. Kurpyakova, N.A. Kolmykova, F.N. Karachevtsev

THE PHASE COMPOSITION RESEARCHING OF THE DIFFUSION LAYER OF HEAT-RESISTANT STEEL VKS10-U-Sh

The phase composition of the diffusion layer of high-strength heat-resistant precipitation-hardening steel VKS10-U-Sh, microalloyed with rare-earth metals (REM) after a comprehensive chemical and heat treatment, comprising the steps of vacuum carburizing, strengthening heat treatment (tempering, quenching, maraging and ion-plasma nitriding) has been investigated. The methods of physical-chemical phase analysis (PCPA), electron back scatter diffraction (EBSD) and scanning electron microscopy (SEM) have been used. The data obtained by different methods have allowed finding out which alloying elements form the phase composition of steel and which carbides and nitrides give it the necessary properties.

Keywords: *heat-resistant steel, phase analysis, isolation phases, physic-chemical phase analysis, PCPA, SEM, μ XRF, diffraction of reflected electrons, electron back scatter dif-fraction, EBSD, carbides, nitrides.*

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

Введение

Теплостойкая дисперсионно-твердеющая сталь ВКС-10У-Ш, микролегированная редкоземельными элементами (РЗМ), является перспективным материалом для изготовления деталей при производстве зубчатых колес редукторов газотурбинных двигателей (ГТД) [1, 2]. Сталь ВКС-10У-Ш обладает высокими контактной и циклической прочностью, теплостойкостью и износостойкостью [3, 4]. Эти свойства зависят в первую очередь от качества упрочнения поверхностного слоя материала [5–9].

Сталь ВКС-10У-Ш приобретает необходимые свойства при проведении комплексной химико-термической обработки (ХТО) [10, 11], в процессе которой в диффузионном слое формируются дисперсные частицы карбидов и нитридов сложного фазового состава [12–14]. Этот процесс обусловлен выбранной системой легирования стали ВКС-10У-Ш [15] – значительной (более 6%) суммарной концентрацией сильных карбидообразующих элементов: хрома, молибдена, ванадия, ниобия и вольфрама [16, 17].

В процессе исследования диффузионных слоев стали ВКС-10У-Ш, полученных на разных стадиях комбинированной ХТО, методами физико-химического фазового анализа (ФХФА), дифракции отраженных электронов (ДОЭ) и растровой электронной микроскопии (РЭМ) получена информация о структурных формулах и типах кристаллических решеток карбидов и нитридов следующих переходных металлов: Fe, Cr, Mo, W, Nb. Благодаря этим фазам и происходит упрочнение поверхности, а диффузионные слои приобретают теплостойкость.

Материалы и методы

Качественный фазовый состав определяли методом физико-химического фазового анализа и дифракции отраженных электронов.

Метод ФХФА представляет собой сочетание электрохимической пробоподготовки (электрохимического изолирования фаз) и исследования полученных анодных осадков (изолятов) методом порошковой рентгеновской дифракции [18–20].

В ФХФА, как правило, наблюдается бóльшая избирательная способность к растворению контактирующих твердых фаз сплава в электролите в тех случаях, когда фазы имеют разный химический состав, по сравнению со случаями контакта с электролитом твердых фаз на одинаковой металлической основе [21], что характерно для большинства современных сталей и сплавов. В связи с этим такой метод имеет высокую погрешность при определении точного количества изолированных фаз и их процентных соотношений. Однако несомненным плюсом является то, что метод ФХФА нелокальный и позволяет выделить и идентифицировать фазы, содержащиеся в большом объеме образца, причем как фазу матрицы, так и фазы, содержащиеся в малом количестве [22]. Метод ФХФА впервые начал применяться более 60 лет назад в ВИАМ [23].

Метод ДОЭ является локальным и используется в РЭМ в качестве дополнительного аналитического метода, позволяющего на поверхности массивных поликристаллов определять ориентации отдельных зерен, локальную текстуру, корреляцию ориентаций между точками, идентифицировать фазы и их распределение по поверхности образца. В настоящее время метод ДОЭ является альтернативой рентгеновскому дифракционному методу [24]. Бурное развитие ДОЭ за последние десять лет позволило успешно применять его для аттестации даже очень сложных структур – нанокристаллических, сильно деформированных и т. д. Метод ДОЭ интенсивно используется для изучения важнейших явлений в физическом материаловедении – пластической деформации, фазовых превращений, рекристаллизации и др. [25].

Условия проведения исследований и оборудование

Для стали ВКС-10У-Ш состав электролита для ФХФА был следующим: водный раствор, содержащий 10% HCl и 3% лимонной кислоты. Условия электролиза: плотность тока $0,15 \text{ А/см}^2$, продолжительность 15 мин [26]. Исследования проводили на образцах цилиндрической формы высотой 2–2,5 см, диаметром 1–2 см. В процессе электролиза при заданных условиях происходит растворение поверхностного слоя образца толщиной $\sim 0,05\text{--}0,1 \text{ мм}$, при этом на поверхности образца остается осадок, представляющий собой высокодисперсный порошок. Образцы взвешивались до электролиза и после снятия анодного осадка. Перед снятием осадка образцы промывали от остатков электролита дистиллированной водой. Анодный осадок снимали с образца с помощью ультразвука, затем просушивали и исследовали фазовый состав осадка методом рентгеноструктурного анализа на дифрактометре D/Max-2500 фирмы Rigaku. Для расшифровки рентгенограмм использовалось программное обеспечение на базе данных PDF-2.

Микрорентгеноспектральный анализ и фазовый анализ методом дифракции отраженных электронов проводили на сканирующем электронном микроскопе Hitachi SU8000, оснащенный системой микроанализа Oxford Instruments NanoAnalysis, включающей в себя энергодисперсионный рентгеновский детектор XMax^N80 и дифрактометр EBSD AzTec HKL Advanced.

Результаты

Физико-химический фазовый анализ

При исследовании поверхности твердого образца стали ВКС-10У-Ш на рентгеновском дифрактометре можно обнаружить только α -Fe (ОЦК решетка) – матрицу стали, в то время как анализ изолята позволяет получить информацию о тех фазах, доля которых намного меньше основной фазы, содержащейся в материале (рис. 1).

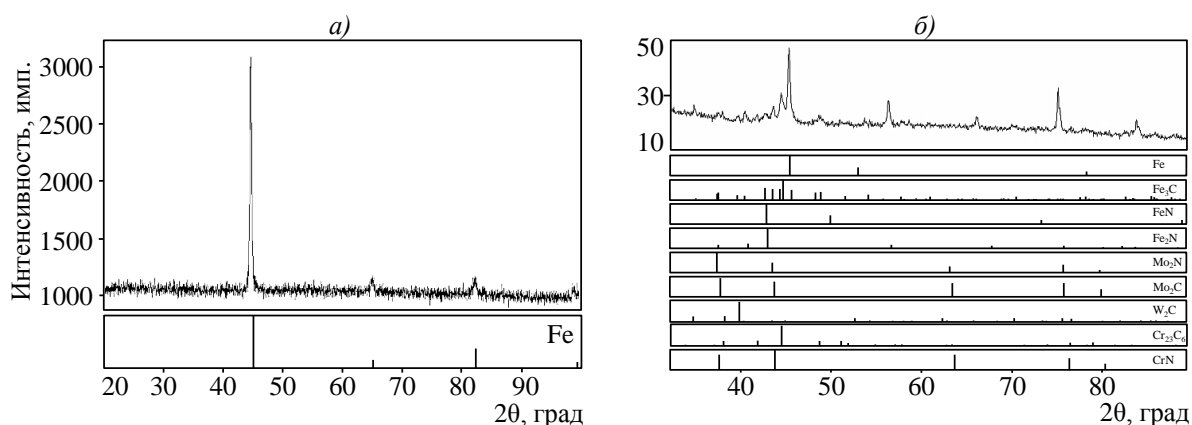


Рисунок 1. Дифрактограммы, полученные при анализе поверхности образца стали ВКС-10У-Ш (а) и изолята снятого с образца (б) после азотирования

В табл. 1 приведены результаты рентгеноструктурного анализа изолятов, полученных с образцов стали ВКС-10У-Ш на разных стадиях ХТО.

Таблица 1

Фазы, обнаруженные в изолятах стали ВКС-10У-Ш

Условный номер образца	Химико-термическая обработка	Фазовый состав				
		α -Fe	Fe_3C	–	$Cr_{23}C_6$ (следы), Cr_7C_3	–
1	Вакуумная цементация+ +высокий отпуск	α -Fe	Fe_3C	–	$Cr_{23}C_6$ (следы), Cr_7C_3	–
2	Вакуумная цементация+ +высокий отпуск+закалка	α -Fe	Fe_3C	–	$Cr_{23}C_6$ (следы), Cr_7C_3	–
3	Вакуумная цементация+ +высокий отпуск+закалка+старение	α -Fe	Fe_3C	Mo_2C	$Cr_{23}C_6$, Cr_7C_3 (следы)	W_2C
4	Вакуумная цементация+ +высокий отпуск+закалка+старение+ +ионно-плазменное азотирование	α -Fe	Fe_3C , FeN , Fe_2N	Mo_2C , Mo_2N	$Cr_{23}C_6$, Cr_7C_3 (следы), CrN	W_2C

Растровая электронная микроскопия и микрорентгеноспектральный анализ

Микроструктура диффузионного слоя стали ВКС-10У-Ш после термической обработки и азотирования представлена на рис. 2 и 3. Кроме мартенситной матрицы (игольчатая структура – рис. 2, *а* и рис. 3) в диффузионном слое видны частицы неправильной геометрической формы с округлыми краями. Размер отдельных микрочастиц составляет 1×1 мкм и меньше (рис. 2, *б*), однако встречается много сросшихся друг с другом микрочастиц, особенно в том месте, где поверхности образца образуют угол (область встречной диффузии), максимальный размер частиц в этом случае – до 20×5 мкм (рис. 3). Наибольшая плотность частиц наблюдается в приповерхностной части диффузионного слоя толщиной ~ 400 мкм.

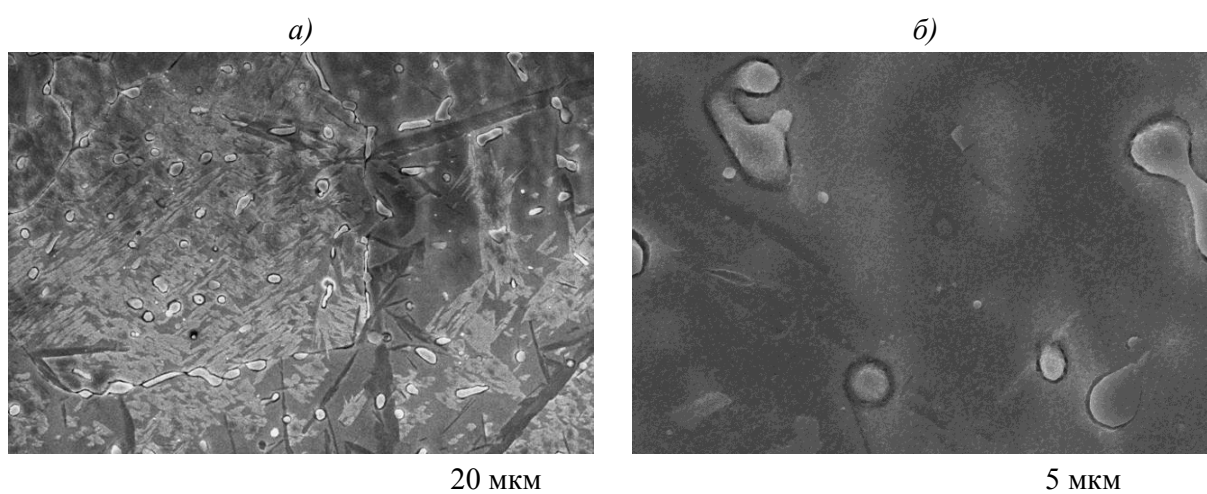


Рисунок 2. Микроструктура (*а* – $\times 2000$; *б* – $\times 10000$) диффузионного слоя стали ВКС-10У-Ш после термической обработки и азотирования

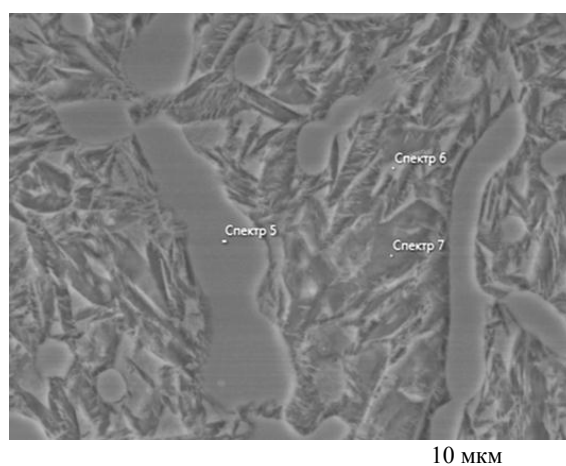


Рисунок 3. Частицы карбидов и нитридов в диффузионном слое стали ВКС-10У-Ш после термической обработки и азотирования

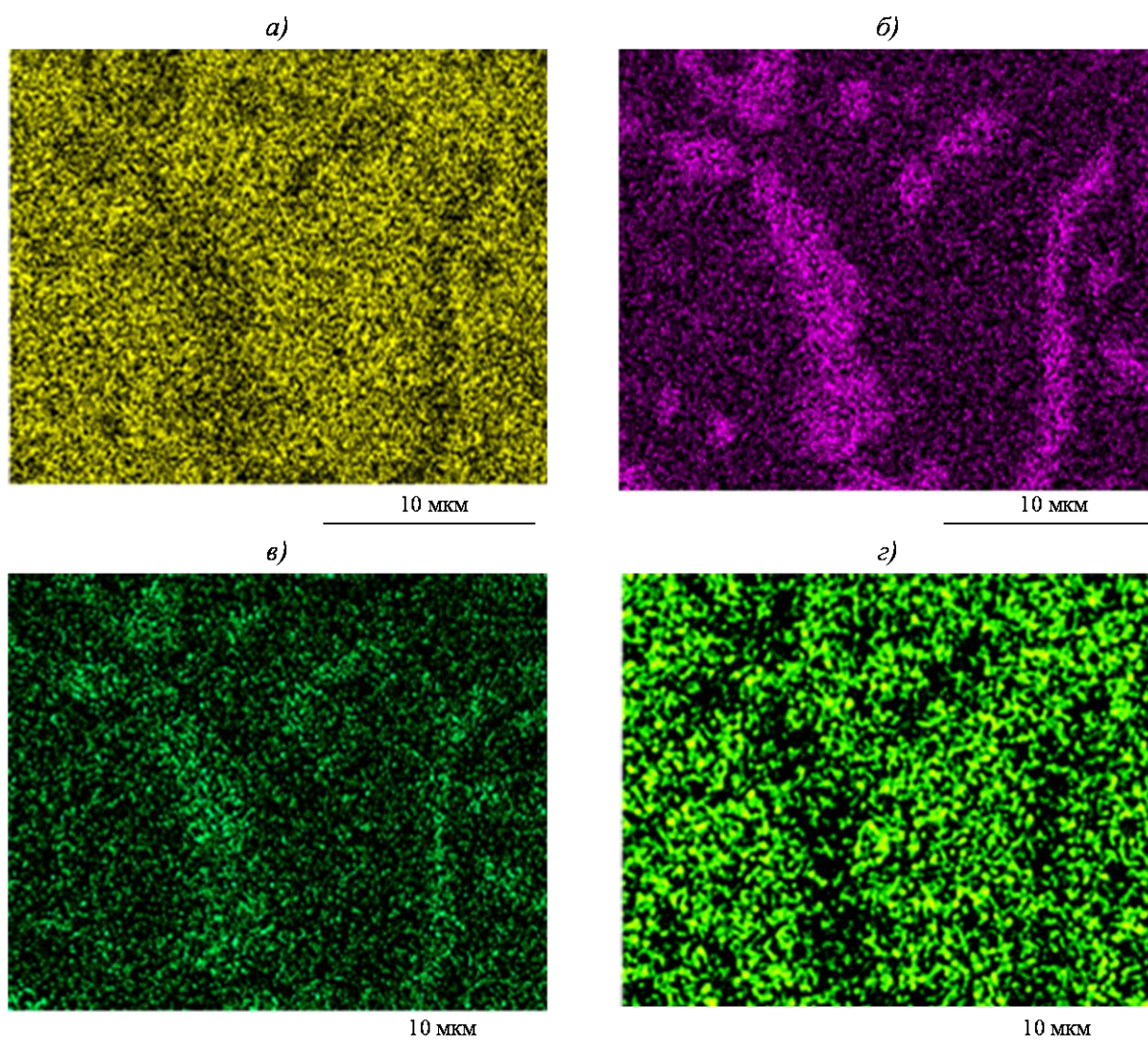


Рисунок 4. Карты распределения элементов Fe (а), Cr (б), Mo (в), Ni (г), соответствующие (см. рис. 2)

Химический состав отдельных микрочастиц и матрицы был изучен методом микрорентгеноспектрального анализа (рис. 3, точки 5, 6, 7). Выявлено, что в сросшихся образованиях в виде округлых частиц содержится в 4 раза больше Cr и в 2 раза – Mo, чем в матрице. Концентрация C и N также выше, чем в матрице, в которой содержится больше Fe и Ni, при этом в распределении остальных элементов (Si, Mn, W, V, Nb) заметных изменений не наблюдается. На рис. 4 приведены карты распределения некоторых элементов, полученные методом энергодисперсионного спектрометрического анализа.

Метод дифракции отраженных электронов

Для электронного микроскопа использовались следующие настройки: ускоряющее напряжение 15 кВ, ток 10 мА, расстояние между полюсным наконечником и образцом 15 мм. Параметры идентификации фаз: разрешение пространства Хафа – 70, базы данных NIST, ICSD. Перед анализом образцы подвергали ионно-плазменному травлению. Поиск фаз и их идентификация проводились по нескольким точкам на разных участках образца, как показано на рис. 5. В табл. 2 приведен фазовый состав образца 4 стали ВКС-10У-Ш.

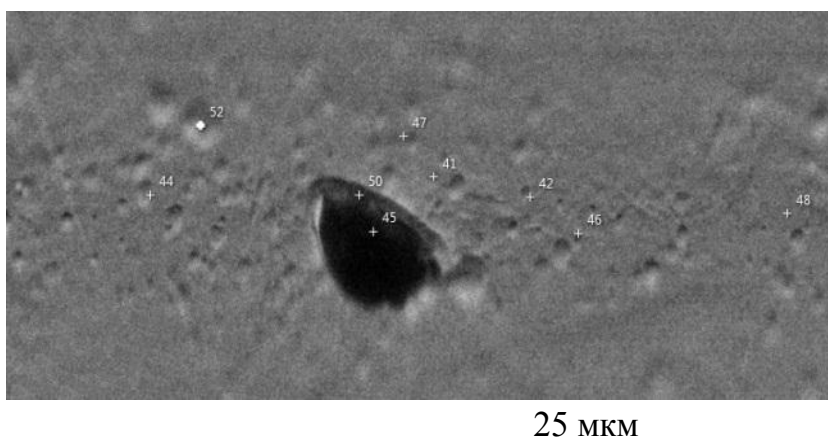


Рисунок 5. Микроструктура одного из участков образца стали ВКС-10У-Ш, на котором проводился анализ методом ДОЭ

Таблица 2

Фазы, обнаруженные методом ДОЭ в диффузионном слое образца 4 стали ВКС-10У-Ш после термической обработки и азотирования

Фазовый состав				
α -Fe	Fe_3C , Fe_7C_3 , Fe_2C , Fe_5C_2 , FeN, FeNiN, Fe_2N , Fe_3N , Fe_8N , Fe_{16}N_2	Mo_2C , Mo_2N	Cr_{23}C_6 , Cr_7C_3 , CrN	WC

Обсуждение и заключения

Исследование диффузионного слоя образцов стали ВКС10-У-Ш с помощью РЭМ показало, что в нем содержатся дисперсные нано- и микрочастицы неправильной геометрической формы с округлыми краями, которые образуют зону толщиной от 300 до 500 мкм. Методом дифракции отраженных электронов в составе этих частиц обнаружено несколько фаз, которые были идентифицированы (табл. 2) в образцах 1–3 как карбиды, а в образце 4 – как карбиды и нитриды. Эти данные соответствуют результатам, полученным при ФХФА (табл. 1). Методами МРСА и энергодисперсионного спектрометрического картирования всех образцов выявлено, что образования обогащены Cr и Mo, обеднены Fe и Ni, содержание C в них выше, чем в близлежащих областях, а в образце 4 повышенное содержание N (рис. 4), что также подтверждает данные, по-

лученные при ФХФА и ДОЭ. На микроструктурах (рис. 2 и 3) видно, что частицы окружены матрицей, которая имеет игольчатую структуру. Анализ матрицы методом ДОЭ позволил идентифицировать фазы Fe_3C (цементит), α -Fe (ОЦК решетка), что также было получено при ФХФА.

Таблица 3

Фазы, входящие в состав диффузионного слоя стали ВКС10-У-Ш

Условный номер образца	Химико-термическая обработка	Фазовый состав									
		Fe (ОЦК)	Fe_3C , Fe_7C_3 , Fe_2C , Fe_5C_2	FeN , Fe_2N , Fe_3N , Fe_8N , $Fe_{16}N_2$, $FeNiN$	Mo_2C	Mo_2N	Cr_7C_3 , $Cr_{23}C_6$	CrN	NbC	NbN	WC, W_2C
1, 2	Вакуумная цементация+ +высокий отпуск+закалка			-	-	-		-	-	-	-
3	Вакуумная цементация+ +высокий отпуск+ +закалка+старение			-		-		-		-	
4	Вакуумная цементация+ +высокий отпуск+ +закалка+старение+ионно- плазменное азотирование										

Сравнив полученные данные, можно сделать вывод, что и ФХФА, и метод ДОЭ позволяют определить качественный фазовый состав диффузионного слоя. Однако методом ФХФА идентифицировано меньшее количество фаз. Это обусловлено тем, что фазы, имеющие одинаковый элементный состав, плохо изолируются друг от друга. Построить карту распределения фаз в диффузионном слое мешает быстрая намагничиваемость образца магнитным полем колонны растрового электронного микроскопа. Метод ДОЭ дает информацию о фазовом составе отдельных участков диффузионного слоя. А данные ФХФА – это общий фазовый состав той части диффузионного слоя, которая была изолирована после избирательного растворения поверхностного слоя всего образца при электролизе. Таким образом, результаты этих методов взаимно дополняют и подтверждают друг друга, что позволяет убедиться в правильности полученных результатов и построить общую картину образования карбидных и нитридных фаз на всех стадиях ХТО (табл. 3).

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» //Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33.

2. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий //Труды ВИАМ. 2013. №2. Ст. 01 (viam-works.ru).
3. Герасимов С.А., Куксенова Л.И., Лаптева В.Г. Структура и износостойкость азотированных сталей и сплавов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. 518 с.
4. Герасимов С.А., Куксенова Л.И., Лаптева В.Г., Фахуртдинов Р.С., Алексеева М.С., Хренникова И.А., Борейко Н.Л., Смирнов А.Е., Красовский Д.С. Влияние ионно-плазменного азотирования и вакуумной цементации на износостойкость сталей ВКС-7 и ВКС-10 //Наука и образование. 2013. №6. С. 391–400.
5. Вознесенская Н.М., Каблов Е.Н., Петраков А.Ф., Шалькевич А.Б. Высокопрочные коррозионностойкие стали аустенитно-мартенситного класса //МиТОМ. 2002. №7. С. 34–37.
6. Мубояджян С.А., Луценко А.Н., Александров Д.А., Горлов Д.С. Исследование возможности повышения служебных характеристик лопаток компрессора ГТД методом ионного модифицирования поверхности //Труды ВИАМ. 2013. №1. Ст. 02 (viam-works.ru).
7. Щербаков А.И., Крылов С.А., Калицев В.А., Игнатов В.А. Разработка технологии выплавки высокопрочной мартенситостареющей стали ВКС-180-ИД (01Н18К9М5Т), микролегированной РЗМ //Труды ВИАМ. 2015. №2. Ст. 04 (viam-works.ru).
8. Разуваев Е.И., Капитаненко Д.В. Влияние термомеханической обработки на структуру и свойства аустенитных сталей //Труды ВИАМ. 2013. №5. Ст. 01 (viam-works.ru).
9. Громов В.И., Курпякова Н.А., Седов О.В., Коробова Е.Н. Вакуумная и ионно-плазменная химико-термическая обработка ответственных деталей газотурбинных двигателей //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 147–156.
10. Тонышева О.А., Вознесенская Н.М., Шалькевич А.Б., Петраков А.Ф. Исследование влияния высокотемпературной термомеханической обработки на структуру, технологические, механические и коррозионные свойства высокопрочной коррозионно-стойкой стали переходного класса с повышенным содержанием азота //Авиационные материалы и технологии. 2012. №3. С. 31–36.
11. Громов В.И., Уткина А.Н., Курпякова Н.А. Дисперсионное твердение цементированного слоя теплостойких сталей мартенситного класса при термической обработке //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. №SP2. С. 137–142.

12. Тонышева О.А., Вознесенская И.М., Елисеев Э.А., Шалькевич А.Б. Новая высокопрочная экономнолегированная азотосодержащая сталь повышенной надежности //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 84–88.
13. Герасимов С.А., Куксенова Л.И., Лаптева В.Г., Фахуртдинов Р.С., Смирнов А.Е., Громов В.И., Ступников В.В. Исследование износостойкости сталей ВКС-7 и ВКС-10 после вакуумной цементации и вакуумной нитроцементации //Наука и образование. 2013. №5. 345 с.
14. Тарасенко Л.В., Титов В.И., Уткина А.Н. Свойства и фазовый состав высокоуглеродистой стали для зубчатых колес авиационной техники //Металлургия машиностроения. 2012. №3. С. 10–14.
15. Каблов Е.Н., Кривоногов Г.С. Легирование и фазовая нестабильность высокопрочных коррозионностойких сталей //Металлы. 2002. №2. С. 65–73.
16. Лахтин Ю.М., Коган Я.Д. Азотирование стали. М.: Машиностроение. 1976. 15 с.
17. Семенов М.Ю., Смирнов А.Е., Лашнев М.М., Ступников В.В. Математическая модель вакуумной нитроцементации теплостойкой стали ВКС-10 //Наука и образование. 2013. №8. С. 76.
18. Голубцова Р.Б. Фазовый анализ никелевых сплавов. М.: Наука. 1969. С. 5–33.
19. Renata Chylinska, Malgorzata Garbiak, Bogdan Piekarski Electrolytic Phase Extraction in Stabilised Austenitic Cast Steel //Material Science (MEDŹIAGOTYRA). 2005. V. 11. №4. P. 348–351.
20. Hye-Youn Lee, Masahiko Demura, Ya Xub, Dang-Moon Weea, Toshiyuki Hirano Selective dissolution of the γ phase in a binary Ni(γ)/Ni₃Al(γ') two-phase alloy //Corrosion Science. 2010. V. 52. P. 3820–3825.
21. Лашко Н.Ф., Заславская Л.В., Козлова М.Н., Морозова Г.И., Сорокина К.П., Яковлева Е.Ф. Физико-химический анализ сталей и сплавов. 2-е изд. М.: Metallurgy. 1978. 28 с.
22. Лашко Н.Ф., Заславская Л.В., Козлова М.Н., Морозова Г.И., Сорокина К.П., Хахлова Н.В., Яковлева Е.Ф. Физико-химические методы фазового анализа сталей и сплавов. М.: Metallurgy. 1970. С. 9–19.
23. Морозова Г.И. К истории создания метода физико-химического фазового анализа //МиТОМ. 2006. №8. С. 19–21.
24. Метод дифракции отраженных электронов в материаловедении /Под ред. А. Шварца, М. Кумара, Б. Адамса, Д. Филда. М.: Техносфера. 2014. 21 с.

25. Даниленко В.Н., Миронов С.Ю., Беляков А.Н., Жиляев А.П. Применение EBSD анализа в физическом материаловедении (обзор) //Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. Т. 78. №2. С. 28–46.
26. Лашко Н.Ф., Заславская Л.В., Козлова М.Н., Морозова Г.И., Сорокина К.П., Яковлева Е.Ф. Физико-химический анализ сталей и сплавов. 2-е. изд. М.: Металлургия. 1978. С. 113–117.

REFERENCES LIST

1. Kablov E.N. Innovacionnye razrabotki FGUP «VIAM» GNC RF po realizacii «Strategicheskikh napravlenij razvitiya materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda» [Innovative development of VIAM Federal State Unitary Enterprise of GNTs Russian Federation on implementation «The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030»] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2015. №1 (34). S. 3–33.
2. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Vershkov A.V. Redkie metally i redkozemel'nye jelementy – materialy sovremennyh i budushhih vysokih tehnologij [Rare metals and rare earth elements – materials of modern and future high technologies] //Trudy VIAM. 2013. №2. St. 01 (viam-works.ru).
3. Gerasimov S.A., Kuksenova L.I., Lapteva V.G. Struktura i iznosostojkost' azotirovannyh stalej i splavov [Structure and wear resistance nitrated staly and alloys]. М.: MGTU im. N.Иe. Bauman. 2012. 518 s.
4. Gerasimov S.A., Kuksenova L.I., Lapteva V.G., Fahurtdinov R.S., Alekseeva M.S., Hrennikova I.A., Borejko N.L., Smirnov A.E., Krasovskij D.S. Vlijanie ionno-plazmennogo azotirovanija i vakuumnoj cementacii na iznosostojkost' stalej VKS-7 i VKS-10 [Influence of ion plasma nitriding and vacuum cementation on wear resistance staly VKS-7 and VKS-10] //Nauka i obrazovanie. 2013. №6. S. 391–400.
5. Voznesenskaja N.M., Kablov E.N., Petrakov A.F., Shal'kevich A.B. Vysokoprochnye korrozionnostojkie stali austenitno-martensitnogo klassa [High-strength corrosion-resistant steel of the austenitno-martensitic class] //MiTOM. 2002. №7. S. 34–37.
6. Mubojadzhan S.A., Lucenko A.N., Aleksandrov D.A., Gorlov D.S. Issledovanie vozmozhnosti povyshenija sluzhebnyh karakteristik lopatok kompressora GTD metodom ionnogo modificirovanija poverhnosti [Research of possibility of increase of office characteristics of compressor blades of GTD by method of ionic modifying of surface] //Trudy VIAM. 2013. №1. St. 02 (viam-works.ru).

7. Shherbakov A.I., Krylov S.A., Kalicev V.A., Ignatov V.A. Razrabotka tehnologii vyplavki vysokoprochnoj martensitostarejushhej stali VKS-180-ID (01N18K9M5T), mikrolegirovannoj RZM [Development of smelting technology of high-strength maraging steel VKS-180-ID (01H18K9M5T), microalloyed RZM] //Trudy VIAM. 2015. №2. St. 04 (viam-works.ru).
8. Razuvaev E.I., Kapitanenko D.V. Vlijanie termomehanicheskoj obrabotki na strukturu i svojstva austenitnyh stalej [Influence of thermomechanical processing on structure and property austenitic steels] //Trudy VIAM. 2013. №5. St. 01 (viam-works.ru).
9. Gromov V.I., Kurpjakova N.A., Sedov O.V., Korobova E.N. Vakuumnaja i ionno-plazmennaja himiko-termicheseskaja obrabotka otvetstvennyh detalej gazoturbinyh dvigatelej [Vacuum and ion-plasma chemical and thermal processing of responsible details of gas turbine engines] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 147–156.
10. Tonyшева O.A., Voznesenskaja N.M., Shal'kevich A.B., Petrakov A.F. Issledovanie vlijanija vysokotemperaturnoj termomehanicheskoj obrabotki na strukturu, tehnologicheskie, mehanicheskie i korrozionnye svojstva vysokoprochnoj korrozionnostojkoj stali perehodnogo klassa s povyshennym sodержaniem azota [Research of influence of high-temperature thermomechanical processing on structure, technological, mechanical and corrosion properties of high-strength corrosion-resistant steel of transitional class with the raised content of nitrogen] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №3. S. 31–36.
11. Gromov V.I., Utkina A.N., Kurpjakova N.A. Dispersionnoe tverdenie cementirovannogo sloja teplostojkih stalej martensitnogo klassa pri termicheskoj obrabotke [Dispersion hardening of cemented layer heatresistant steels the martensitic class at thermal processing] //Vestnik MGTU im. N. Je. Baumana. Ser. «Mashinostroenie». 2011. №SP2. S. 137–142.
12. Tonyшева O.A., Voznesenskaja I.M., Eliseev Je.A., Shal'kevich A.B. Novaja vysokoprochnaja jekonomnolegirovannaja azotosoderzhashhaja stal' povyshennoj nadezhnosti [New high-strength economical nitrogen-bearing steel of increased reliability] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 84–88.
13. Gerasimov S.A., Kuksenova L.I., Lapteva V.G., Fahurtdinov R.S., Smirnov A.E., Gromov V.I., Stupnikov V.V. Issledovanie iznosostojkosti stalej VKS-7 i VKS-10 posle vakuumnoj cementacii i vakuumnoj nitrocementacii [Research of wear resistance steels VKS-7 and VKS-10 after vacuum cementation and vacuum nitrocementation] //Nauka i obrazovanie. 2013. №5. 345 s.

14. Tarasenko L.V., Titov V.I., Utkina A.N. Svojstva i fazovyj sostav vysokouglerodistoj stali dlja zubchatyh koles aviacionnoj tehniki [Properties and phase composition of high-carbon steel for toothed wheels of aviation engineering] //Metallurgija mashinostroenija. 2012. №3. S. 10–14.
15. Kablov E.N., Krivonogov G.S. Legirovanie i fazovaja nestabil'nost' vysokoprochnyh korrozionnostojkikh stalej [Alloying and phase instability high-strength corrosion-resistant staly] //Metally. 2002. №2. S. 65–73.
16. Lahtin Ju.M., Kogan Ja.D. Azotirovanie stali [Steel nitriding]. M.: Mashinostroenie. 1976. 15 s.
17. Semenov M.Ju., Smirnov A.E., Lashnev M.M., Stupnikov V.V. Matematicheskaja model' vakuumnoj nitro cementacii teplostojkoj stali VKS-10 [Mathematical model of vacuum nitro cementation of VKS-10 heat-resistant steel] //Nauka i obrazovanie. 2013. №8. S. 76.
18. Golubcova R.B. Fazovyj analiz nikelovyh splavov [Phase analysis of nickel alloys]. M.: Nauka. 1969. C. 5–33.
19. Renata Chylinska, Malgorzata Garbiak, Bogdan Piekarski Electrolytic Phase Extraction in Stabilised Austenitic Cast Steel //Material Science (MEDŽIAGOTYRA). 2005. V. 11. №4. P. 348–351.
20. Hye-Youn Lee, Masahiko Demura, Ya Xub, Dang-Moon Weea, Toshiyuki Hirano Selective dissolution of the γ phase in a binary Ni(γ)/Ni₃Al(γ') two-phase alloy //Corrosion Science. 2010. V. 52. P. 3820–3825.
21. Lashko N.F., Zaslavskaja L.V., Kozlova M.N., Morozova G.I., Sorokina K.P., Jakovleva E.F. Fiziko-himicheskij analiz stalej i splavov [Physical and chemical analysis staly and alloys]. 2-e izd. M.: Metallurgija. 1978. 28 c.
22. Lashko N.F., Zaslavskaja L.V., Kozlova M.N., Morozova G.I., Sorokina K.P., Hahlova N.V., Jakovleva E.F. Fiziko-himicheskie metody fazovogo analiza stalej i splavov [Physical and chemical methods of the phase analysis staly and alloys]. M.: Metallurgija. 1970. S. 9–19.
23. Morozova G.I. K istorii sozdanija metoda fiziko-himicheskogo fazovogo analiza [To history of creation of method of the physical and chemical phase analysis] //MiTOM. 2006. №8. S. 19–21.
24. Metod difrakcii otrazhennyh jelektronov v materialovedenii [Method of diffraction of the reflected electrons in materials science] /Pod red. A. Shvarca, M. Kumara, B. Adamsa, D. Filda. M.: Tehnosfera. 2014. 21 s.

25. Danilenko V.N., Mironov S.Ju., Beljakov A.N., Zhiljaev A.P. Primenenie EBSD analiza v fizicheskom materialovedenii (obzor) [Application of EBSD of the analysis in physical materials science (review)] //Zavodskaja laboratorija. Diagnostika materialov. 2012. T. 78. №2. S. 28–46.
26. Lashko N.F., Zaslavskaja L.V., Kozlova M.N., Morozova G.I., Sorokina K.P., Jakovleva E.F. Fiziko-himicheskij analiz stalej i splavov [Physical and chemical analysis staly and alloys]. 2-e. izd. M.: Metallurgija. 1978. C. 113–117.