

УДК 669.018.44:629.245

М.М. Бакрадзе¹, Б.С. Ломберг¹, Е.В. Филонова¹, Е.Б. Чабина¹

ОЦЕНКА СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЙ СТАБИЛЬНОСТИ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА ВЖ175 ПОСЛЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И ИМИТАЦИЙ НАРАБОТОК ПРИ РАБОЧЕЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-7-5-5

Исследованы изменения структуры и фазового состава сплава ВЖ175-ИД для дисков турбин ГТД после термической обработки и имитаций наработок (длительных выдержек при максимальной рабочей температуре 750°C). Изучены механические свойства сплава и выполнены фрактографические исследования образцов в исходном (термообработанном) состоянии и после длительных нагревов при рабочей температуре в течение 1000 и 2000 ч.

Ключевые слова: сплав на основе никеля, гомогенизационный отжиг, изотермическая штамповка, термическая обработка, механические свойства.

The changes of microstructure and phase composition of disks for gas turbine engines made of superalloy VJ175 after heat treatment and imitation of operating at working temperature (long-term exposure at maximal operating temperature 750°C) are investigated. Mechanical properties are defined, fractography investigations are carried out in initial (heat treated) condition and after long-term for 1000 and 2000 hours heating up to operating temperature.

Keywords: Ni-base superalloy, anneal, isothermal forging, heat treatment, mechanical properties.

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

Облик современных ГТД во многом определяют материалы, применяемые в их конструкции [1–4]. Наиболее ответственными деталями газогенератора являются диски турбин и компрессора [5]. Для создания высокоэффективных ГТД конструкторам необходимы новые сплавы, обладающие высокими рабочими температурами, статическими и циклическими свойствами. Кроме того, для высокой конкурентоспособности и снижения затрат при эксплуатации двигателей гражданской авиации ресурс роторных деталей, в частности дисков, должен составлять не менее 20000 ч. Таким образом, помимо повышенных механических свойств новые жаропрочные сплавы должны обладать высокой фазовой и структурной стабильностью при длительной наработке во всем диапазоне рабочих температур, в их структуре не должно происходить изменений, приводящих к снижению эксплуатационных характеристик диска [6–13].

Данная работа посвящена исследованию структурно-фазовой стабильности нового жаропрочного сплава ВЖ175-ИД, применяемого для изготовления дисков компрессора и турбины высокого давления двигателя ПД-14.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 10.2. «Изотермическая деформация на воздухе нового поколения гетерофазных

труднодеформируемых жаропрочных сплавов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [14].

Материалы и методы

Исследования проводили на металле промышленной крупногабаритной штамповки ($\varnothing 550$ мм) диска турбины производства АО «Ступинская металлургическая компания». Заготовки под образцы для исследования свойств и структуры вырезали из полотна диска в тангенциальном направлении.

Испытания на кратковременную, длительную прочность и ударную вязкость проводили по ГОСТ 1497, ГОСТ 9454, ГОСТ 10145.

Для микроструктурных исследований применяли методы оптической, растровой электронной микроскопии и микрорентгеноспектрального анализа. Количество и состав фаз определяли локальным микрорентгеноспектральным анализом (МРСА) на установке JСМА-733 (локальность метода 1 мкм^2 , глубина анализа 1 мкм) [15, 16].

Основные характеристики микроструктуры (морфология, распределение и размеры выделений γ' -фазы) изучали методом количественного анализа посредством обработки изображений в компьютерной программе Image Expert Pro 3.

Исследование изломов образцов из сплава ВЖ175-ИД после испытания на ударную вязкость проводили на растровом электронном микроскопе JSM-6490 LV.

Результаты и обсуждение

Для оценки стабильности структурно-фазового состояния и свойств сплава ВЖ175-ИД заготовку диска турбины $\varnothing 550$ мм разрезали на сегменты в тангенциальном направлении. Основную часть сегментов подвергали выдержке в камерной электропечи в течение 1000 и 2000 ч при максимальной рабочей температуре сплава 750°C .

Вторая часть заготовок (микрошлифы) в исходном состоянии исследована методами оптической, растровой электронной микроскопии и микрорентгеноспектрального анализа (МРСА).

Микроструктура штамповки диска из сплава ВЖ175-ИД после стандартной термической обработки (СТО) (рис. 1) однородная, мелкозернистая (8 балла – по ГОСТ 5639), типична для сплава ВЖ175-ИД в термообработанном состоянии. Исследования, проведенные методом растровой электронной микроскопии, показали, что после СТО структура сплава ВЖ175-ИД (рис. 1) представляет собой зерна γ -твердого раствора, внутри которых наблюдаются дисперсные выделения вторичной γ' -фазы. По границам зерен расположены крупные частицы первичной γ' -фазы. Границы зерен упрочнены частицами зернограничной γ' -фазы, вторичных карбидов и боридов различной дисперсности. В сплаве также содержатся первичные карбиды MeC. Морфология частиц вторичной γ' -фазы близка к кубической, в прослойках γ -твердого раствора и на границах раздела фаз наблюдаются частицы третичной γ' -фазы размером <50 нм.

Микрорентгеноспектральным анализом установлен типичный состав фаз в состоянии после СТО: γ' -фаза на основе интерметаллида $(\text{Ni}, \text{Co}, \text{Cr})_3(\text{Al}, \text{Ti}, \text{Nb})$ и карбиды на основе $(\text{Nb}, \text{Ti})\text{C}$, нитриды титана.

Методами оптической и растровой электронной микроскопии установлено, что после выдержек в течение 1000 и 2000 ч при 750°C структура сплава ВЖ175-ИД качественно идентична микроструктуре после СТО. С увеличением длительности выдержки происходит коагуляция частиц первичной и вторичной γ' -фазы, довыделение и коагуляция мелкодисперсной третичной γ' -фазы (рис. 1). Наблюдается увеличение выделений вторичных фаз (карбидов и боридов) по границам зерен и на границах частиц первичной γ' -фазы.

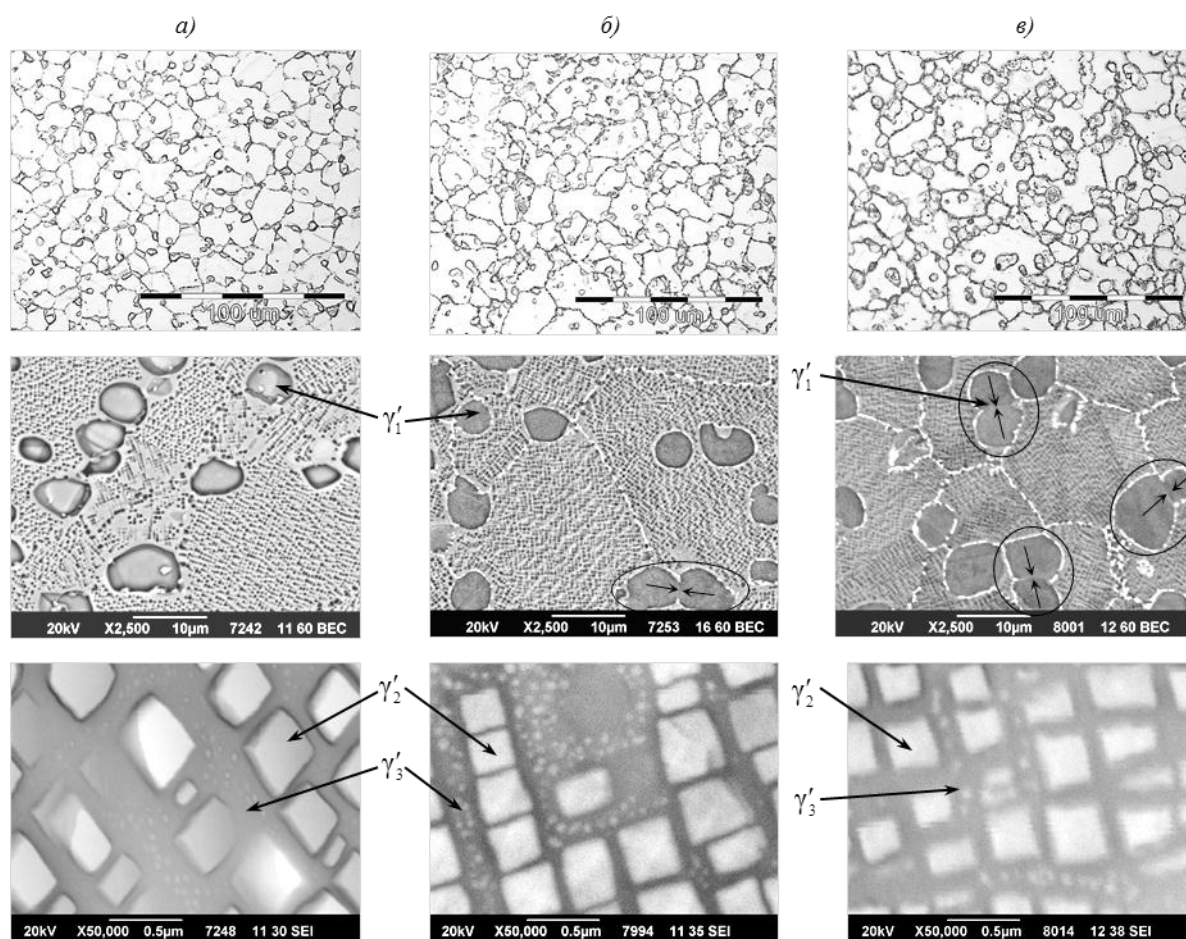


Рис. 1. Микроструктура штамповки из сплава ВЖ175-ИД после стандартной термической обработки (СТО) (а) и после СТО и выдержки при 750°С в течение 1000 (б) и 2000 ч (в)

Микрорентгеноспектральный анализ образцов показал, что после длительных выдержек (1000 и 2000 ч) при 750°С состав основы (под основой подразумевается γ -твердый раствор с мелкодисперсными выделениями γ' -фазы), первичной γ' -фазы и первичных карбидов не изменяется. Ликвационной неоднородности не наблюдается – сплав однороден по химическому составу.

Топологически плотноупакованных (ТПУ) фаз, снижающих свойства, после выдержек в течение 1000 и 2000 ч при 750°С в сплаве ВЖ175-ИД не обнаружено.

Проведена обработка и анализ в программе Image Expert Pro 3 изображений микроструктуры сплава ВЖ175-ИД (при увеличениях от $\times 500$ до $\times 50000$), полученных методами оптической и электронной микроскопии. Определен средний размер частиц γ' -фазы различной дисперсности в зависимости от состояния сплава (рис. 2).

По результатам исследований, выполненных методами оптической и растровой электронной микроскопии, МРСА, анализа структуры в программе Image Expert Pro 3 можно заключить, что длительные выдержки при рабочей температуре приводят к коагуляции частиц γ' -фазы, карбидов и боридов в теле зерен и на границах раздела фаз (рис. 1 и 2). Причем с повышением длительности выдержки с 1000 до 2000 ч увеличивается средний размер выделений упрочняющих фаз (рис. 2). Фазовый состав сплава по сравнению с исходным термообработанным состоянием не изменяется. Перерождения карбидных частиц в ТПУ фазы не происходит.

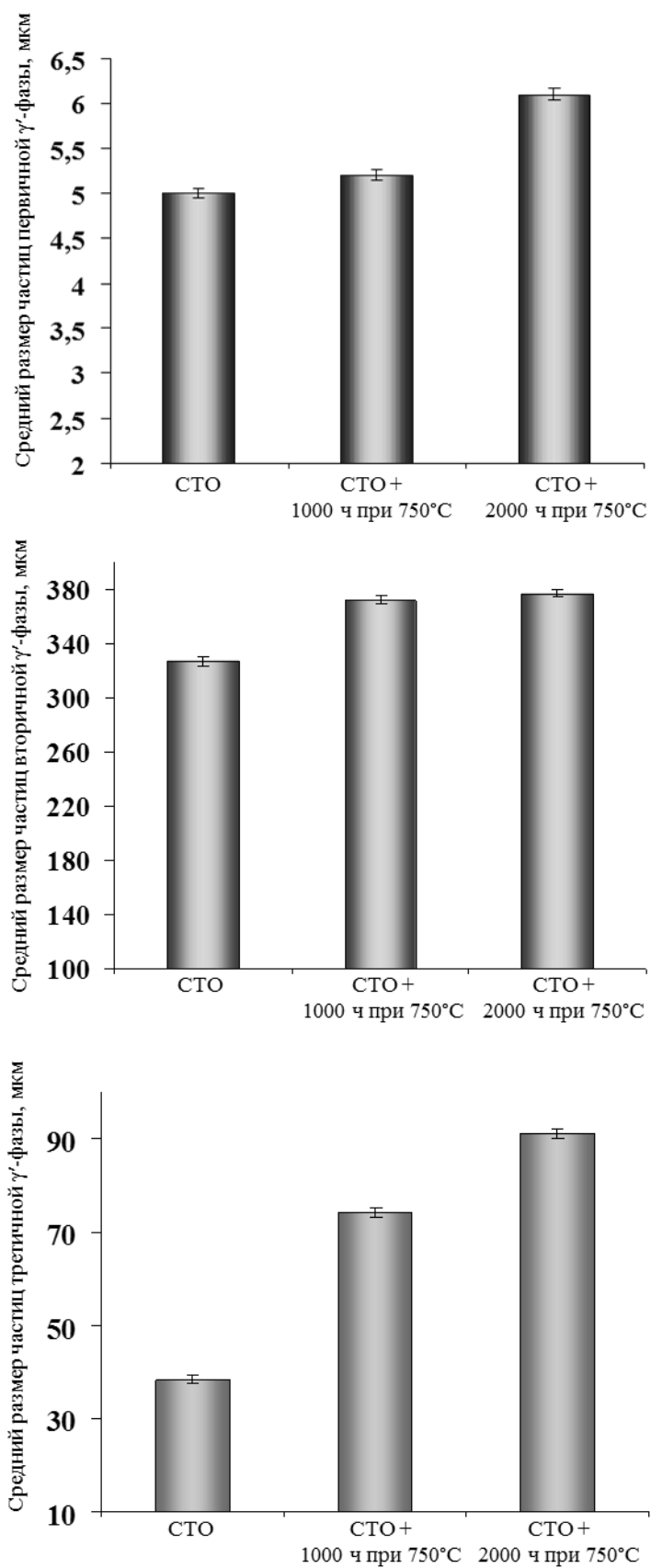


Рис. 2. Влияние длительных выдержек после стандартной термической обработки (СТО) при рабочей температуре на средний размер частиц γ' -фазы

Проведены исследования механических свойств сплава ВЖ175-ИД в исходном состоянии и после длительных нагревов при 750°C (см. таблицу). Дополнительно испытаны образцы из сегментов заготовок сплава, подвергнутых выдержке в течение 1800 ч при 750°C с кратковременным (30 мин) забросом температуры до 850°C. Эти исследования проведены для имитации на дисках возможных максимальных забросов температуры при пиковых нагрузках – в моменты взлета и посадки.

**Средние значения свойств сплава ВЖ175 в исходном состоянии
после стандартной термической обработки (СТО)
с последующими длительными выдержками при рабочих температурах**

Состояние	Кратковременная прочность и пластичность при 20°C				КСУ, Дж/см ²	Жаропрочность при температуре, °C			
	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ		650		750	
	МПа		%			σ , МПа	τ_p , ч	σ , МПа	τ_p , ч
В исходном состоянии (после СТО)	1562	1110	17,8	18,0	50	1050	100	637	100
СТО+выдержка 1000 ч при 750°C	1580	1105	16,7	17,3	32	–	–	637	154,5
СТО+выдержка 1800 ч при 750°C+30 мин при 850°C	1459	1053	13,2	17,2	32	1050	160*	–	–
Требования по нормам технических условий в состоянии после СТО			$\geq 13,0$	$\geq 14,0$	≥ 29	1049	≥ 100	–	–

* Образцы сняты без разрушения.

После выдержки в течение 1000 ч при 750°C по сравнению с исходным состоянием наблюдается незначительное снижение значений $\sigma_{0,2}$ на 0,5%, характеристик пластичности – на 4–6,5% и ударной вязкости. Остальные свойства остаются на уровне исходного состояния. Значения пластичности и ударной вязкости не ниже требований по нормам технических условий для сплава ВЖ175-ИД в исходном состоянии, что свидетельствует о сохранении структурно-фазовой стабильности сплава после выдержки в течение 1000 ч при рабочей температуре.

После выдержки в течение 1800 ч при 750°C с кратковременным (30 мин) забросом температуры до 850°C наблюдается снижение значений σ_b на 7,1%, $\sigma_{0,2}$ – на 5,4%, характеристик пластичности и ударной вязкости. Жаропрочность сохраняется на уровне исходного состояния. Этот режим имитирует длительную наработку сплава с забросом температуры выше рабочей на 100°C. Сохранение пластичности, ударной вязкости, жаропрочности не ниже требований по нормам технических условий и незначительное снижение прочностных характеристик свидетельствуют о высокой структурно-фазовой стабильности и длительной работоспособности сплава ВЖ175-ИД, что также подтверждено микроструктурными исследованиями.

Дополнительно исследовали изломы образцов из штамповки сплава ВЖ175-ИД после испытания на ударную вязкость после СТО и выдержки в течение 1000 ч при 750°C. На обоих образцах получены близкие значения ударной вязкости: 33–34 Дж/см² при 20°C. Макростроение изломов показано на рис. 3.

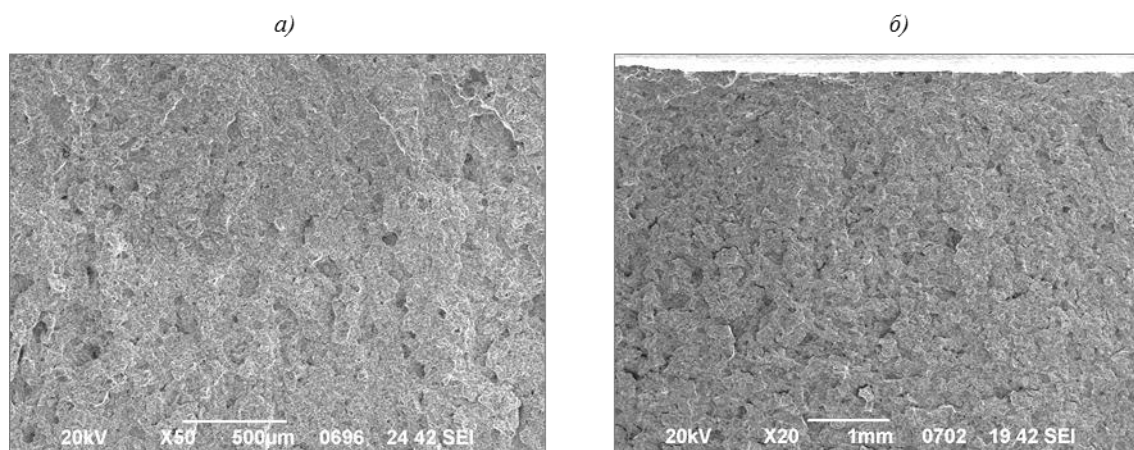


Рис. 3. Макростроение изломов образцов из сплава ВЖ175-ИД после стандартной термической обработки (а) и выдержки в течение 1000 ч при 750°C (б)

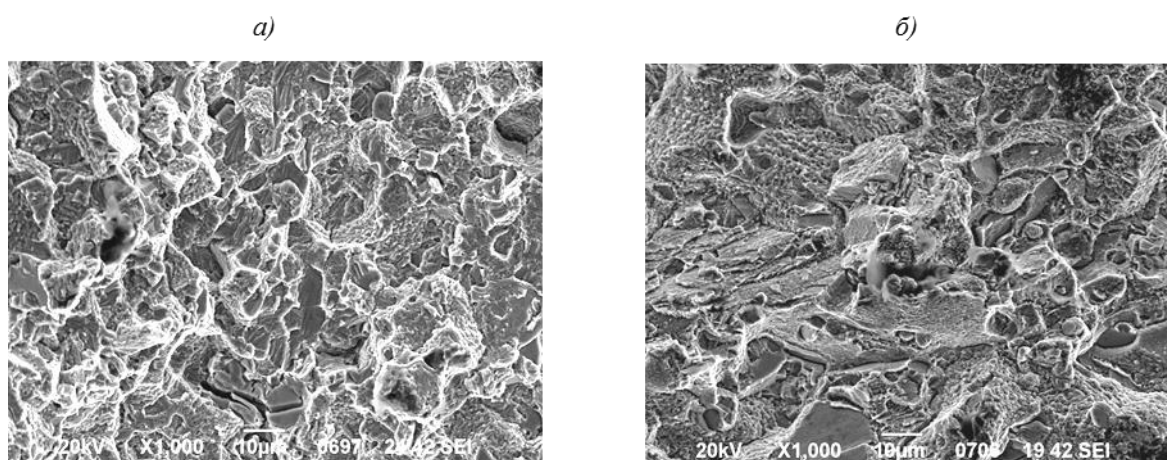


Рис. 4. Микростроение изломов образцов 1 (а) и 2 (б) вблизи границы зон, различающихся по шероховатости рельефа излома

Начальная зона излома, соответствующая моменту страгивания трещины (stretched zone), составляет 15–19 мкм. Аналогичные значения зоны страгивания получены после полной СТО без длительной выдержки. Помимо зоны страгивания трещины в изломах отмечаются еще две зоны (1 и 2), отличающиеся по макро- и микростроению – шероховатости (рис. 4). В более шероховатой зоне встречаются участки межзеренного разрушения. В центральной зоне изломов наблюдаются вторичные трещины по границам зерен первичной γ -фазы и по карбидам. Таким образом, характер разрушения образцов, прошедших СТО с последующей выдержкой в течение 1000 ч при 750°C, не изменился по сравнению с исходным состоянием (после СТО), что свидетельствует о структурной стабильности материала.

Заключения

Результаты исследований структурно-фазового состояния сплава ВЖ175-ИД показали, что после выдержек в течение 1000 и 2000 ч при рабочей температуре структура сплава качественно идентична микроструктуре после СТО. Длительные выдержки при 750°C приводят к коагуляции частиц γ' -фазы, карбидов и боридов в теле зерен и на границах раздела фаз. Причем с повышением длительности выдержки с 1000 до 2000 ч увеличивается средний размер выделений упрочняющих фаз. Фазовый состав сплава по сравнению с исходным термообработанным состоянием не изменится, образования ТПУ фаз не происходит.

Сохранение пластичности, ударной вязкости, жаропрочности не ниже норм технических условий и незначительное (не более чем на 7%) снижение прочностных характеристик свидетельствуют о высокой структурно-фазовой стабильности и длительной работоспособности сплава ВЖ175-ИД, что также подтверждено микроструктурными исследованиями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С., Сидоров В.В. Приоритетные направления развития технологий производства жаропрочных материалов для авиационного двигателестроения // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2013. №3. С. 47–54
2. Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России: сб. науч.-информ. матер. 2-е изд. М.: ВИАМ, 2013. 544 с.
3. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Создание современных жаропрочных материалов и технологий их производства для авиационного двигателестроения // Крылья Родины. 2012. №3–4. С. 34–38.
4. Каблов Е.Н. Основные итоги и направления развития материалов для перспективной авиационной техники // 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007. М.: ВИАМ, 2007. С. 20–26.
5. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М., Мазалов И.С. Высокотемпературные жаропрочные никелевые сплавы для деталей газотурбинных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2012. №8. С. 52–57.
6. Locq D., Caron (Onera) P. On Some Advanced Nickel-Based Superalloys for Disk Applications // High Temperature Materials AL03-01. 2011. Issue 3. P. 1–9.
7. Gabb T.P., Gayda J., Telesman J. Thermal and Mechanical Property Characterization of the Advanced Disk Alloy // NASA / TM–2005-213645. June, 2005.
8. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М. Особенности легирования и термической обработки жаропрочных никелевых сплавов для дисков газотурбинных двигателей нового поколения // Авиационные материалы и технологии. 2010. №2. С. 3–8.
9. Филонова Е.В., Бакрадзе М.М., Кочубей А.Я., Вавилин Н.Л. Исследование изменений структурно-фазового состояния сплава ВЖ175 в процессе горячей деформации и термической обработки // Авиационные материалы и технологии. 2014. №3. С. 10–13. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-3-10-13.
10. Чабина Е.Б., Ломберг Б.С., Филонова Е.В., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М. Изменение структурно-фазового состояния жаропрочного деформируемого никелевого сплава при легировании танталом и рением // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №9. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.02.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-9-3-3.
11. Sharpe H.J., Saxena A. Effect of Microstructure on High-Temperature Mechanical Behavior of Nickel-Base Superalloys for Turbine Disc Applications // EuroSuperalloys 2010: Advanced Materials Research. 2011. Vol. 278. P. 259–264. URL: <http://www.scientific.net> (дата обращения: 02.02.2017).
12. Gabb T.P., Gayda J., Kantzos P. The Grain Size-Temperature Response of Advanced Nickel-Base Disk Superalloys During Solution Heat Treatments // NASA / TM–2007-214912. December, 2007.
13. Пономаренко Д.А., Моисеев Н.В., Скугорев А.В. Производство дисков ГТД из жаропрочных сплавов на изотермических прессах // Авиационные материалы и технологии. 2013. №1. С. 13–16.
14. 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. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
15. Орлов М.Р., Оспенникова О.Г., Автаев В.В., Терехин А.М., Филонова Е.В. Фрактографический анализ эксплуатационного разрушения диска ротора высокого давления авиационного газотурбинного двигателя из жаропрочного сплава ЭП741-НП // Авиационные материалы и технологии. 2015. №S1. С. 5–12. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-S1-5-12.
16. Чабина Е.Б., Алексеев А.А., Филонова Е.В., Лукина Е.А. Применение методов аналитической микроскопии и рентгеноструктурного анализа для исследования структурно-фазового состояния материалов // ТестМат-2013: сб. докл. Всерос. конф. по испытаниям и исследованиям свойств материалов. М., 2013. С. 32.