

УДК 669.018.44:669.245

Б.С. Ломберг<sup>1</sup>, Н.В. Моисеев<sup>1</sup>, М.Н. Летников<sup>1</sup>, А.В. Короткий<sup>1</sup>

## ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОТЖИГА ИСХОДНЫХ ПРЕСС-ПРУТКОВ ПЕРЕД ДЕФОРМАЦИЕЙ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ШТАМПОВОК ИЗ СПЛАВА ЭП742-ИД

DOI: 10/18577/2307-6046-2018-0-5-12-17

*Исследованы процессы рекристаллизации пресс-прутков из сплава ЭП742-ИД, используемых в качестве заготовок при изотермической штамповке дисков малоразмерных ГТД. Определено влияние рекристаллизационного отжига в однофазной области на механические свойства материала штамповок после окончательной термической обработки.*

**Ключевые слова:** рекристаллизация, рекристаллизационный отжиг, микроструктура, механические свойства.

B.S. Lomberg<sup>1</sup>, N.V. Moiseev<sup>1</sup>, M.N. Letnikov<sup>1</sup>, A.V. Korotkiy<sup>1</sup>

## THE INFLUENCE OF ANNEALING TEMPERATURE IN ORIGINAL PRE-DEFORMATION ROUND BARS ON STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF FORGINGS MADE OF EP742-ID ALLOY

*Recrystallization of original compacted round bars made of EP742-ID alloy, used as a blank to the isothermal forging process of small-sized disks for gas-turbine engine, has been researched. Influence of recrystallization annealing in a single-phase area on mechanical properties of forgings material after finish heat treatment has been determine.*

**Keywords:** recrystallization, recrystallization annealing, microstructure, mechanical properties.

---

<sup>1</sup>Федеральное 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

В настоящее время для малоразмерных газотурбинных двигателей (ГТД) широкое применение нашли диски из жаропрочного деформируемого сплава ЭП742-ИД, которые производятся во ФГУП «ВИАМ» [1–4].

Исходными заготовками штамповок дисков для малоразмерных газотурбинных двигателей (ГТД) являются пресс-прутки диаметром 140–150 мм, производимые методом экструзии из слитков  $\varnothing 320$  мм двойной вакуумной выплавки (ВИ+ВДП).

Вследствие невозможности достижения на имеющемся промышленном оборудовании достаточной для получения однородной макро- и микроструктуры степени вытяжки при деформации, структура по сечению пресс-прутков имеет неоднородный характер. Этот недостаток частично устраняется в процессе изготовления штамповок с помощью гомогенизирующих отжигов, последующей деформации и окончательной термической обработки.

Однако полностью исключить «наследственное» влияние исходной структуры пресс-прутков при существующей технологии производства штамповок дисков не удастся. Это обстоятельство в первую очередь отражается на размере микрзерна и

приводит к недостаточной стабильности пластических характеристик материала штамповок дисков ( $\delta^{20^\circ}$ ,  $\psi^{20^\circ}$ ,  $KCU^{20^\circ}$ ).

Для повышения стабильности свойств штамповок дисков после окончательной термообработки, снижения количества повторных испытаний проведена работа по корректировке режима отжига пресс-прутков  $\varnothing 150$  мм из сплава ЭП742-ИД перед началом деформации [5–8].

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 9.7. «Высокотемпературные деформируемые сплавы и композиционные материалы, упрочненные тугоплавкими металлическими волокнами и частицами, карбидами, нитридами и др., истираемые уплотнительные материалы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

### Материалы и методы

В качестве исходных заготовок для штамповок дисков шифра ИШО-90 использовали пресс-прутки  $\varnothing 150$  мм сплава ЭП742-ИД, изготовленные в условиях АО «Металлургический завод «Электросталь» методом двойной вакуумной выплавки (ВИ+ВДП) с последующим прессованием на горизонтальном прессе с усилием 63 МН. Пресс-прутки поставлялись во ФГУП «ВИАМ» по ТУ14-131-663–86.

После проведения входного контроля и гомогенизационного отжига мерные заготовки подвергались ковке в изотермических условиях на гидравлическом прессе с усилием 1600 тс (ПА-2642), а затем после отжига – штамповке в два перехода также в изотермических условиях на гидравлическом прессе с усилием 630 тс (ПА-2638).

Отжиг штамповок и термическую обработку проводили в камерных печах типа ПСКО 1250/640.50.80 [9, 10].

Исследование микроструктуры проводили на оптическом микроскопе Olympus GX-51, изображения обрабатывали в программе Anisys Start. Контроль микроструктуры (размер зерен) проводили по ГОСТ 5639–82 [11].

Значения кратковременной прочности, ударной вязкости и длительной прочности определяли в соответствии с требованиями ТУ1-595-3-725–2013 из кольцевых припусков штамповок.

### Результаты и обсуждение

Пресс-прутки  $\varnothing 150$  мм из сплава ЭП742-ИД, из которых изготавливают штамповки дисков шифра ИШО-90, вследствие существующих условий деформации имеют неравномерный размер зерен от периферии к центру прутка.

Для подготовки заготовок к деформации с целью выравнивания структуры и снятия напряжений проводили гомогенизирующий отжиг в двухфазной области.

Как показали исследования (рис. 1), при существующей температуре отжига заготовок ниже температуры полного растворения упрочняющей  $\gamma'$ -фазы ( $T_{п.р\gamma'}$ ) не происходит полной рекристаллизации структуры и при этом наблюдается существенная разнотернистость.

Очевидно, что наследственность от текстуры прессованного прутка сохраняется до последних технологических операций получения штамповок и не позволяет в полной мере реализовать возможности материала – особенно по значениям пластичности ( $\delta$ ,  $\psi$ ) и ударной вязкости ( $KCU$ ).

Для устранения этого недостатка исследовали влияние температуры отжига перед деформацией на структуру и механические свойства штамповок дисков после окончательной термообработки. При этом необходимо учесть изменение значений температуры  $T_{п.р\gamma'}$  в зависимости от суммы основных упрочняющих элементов в сплаве ( $Ti$ ,  $Al$ ,  $Nb$ ) в пределах марочного состава сплава ЭП742-ИД (рис. 2).

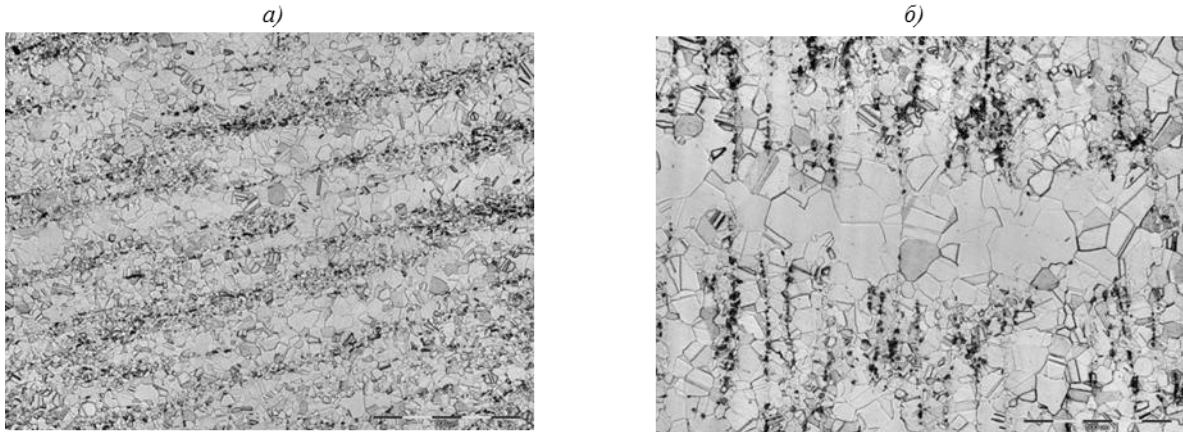


Рис. 1. Микроструктура ( $\times 100$ ) края (а) и центра (б) пресс-прутка  $\varnothing 150$  мм из сплава ЭП742-ИД после отжига при температуре ниже  $T_{п,\gamma'}$

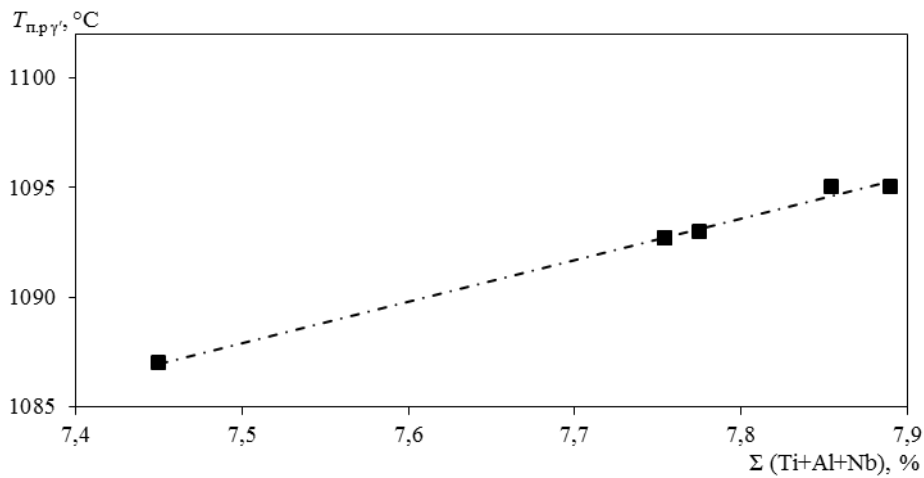


Рис. 2. Изменение температуры  $T_{п,\gamma'}$  в зависимости от суммы основных упрочняющих элементов сплава ЭП742-ИД

Из приведенных на рис. 2 данных видно, что изменение значений температуры  $T_{п,\gamma'}$  в зависимости от плавочного химического состава составляет порядка  $10\text{--}12^\circ C$ . Такая разница по значениям температуры (рис. 3) приводит при  $T_{закалки} > T_{п,\gamma'}$  к заметному укрупнению зерна и существенному снижению пластических характеристик ( $\delta$ ,  $\psi$ ,  $KCV$ ), а при  $T_{закалки} < T_{п,\gamma'}$  – к неполной рекристаллизации и снижению длительной прочности.

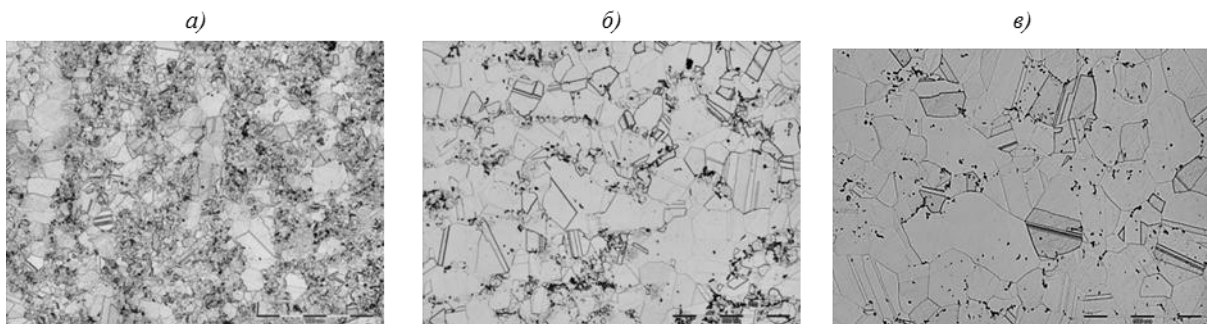


Рис. 3. Микроструктура штамповки диска из сплава ЭП742-ИД при температуре закалки меньше (а), равной (б) и больше температуры  $T_{п,\gamma'}$  (в)

В ранее проведенных исследованиях [12–15] показано, что оптимальный комплекс механических свойств штамповок дисков соответствует температуре закалки после окончательной термообработки, равной  $T_{п.п\gamma'}$ .

Для выбора режима отжига исходного прутка исследована макро- и микроструктура из центральной части исходного прутка (наименее проработанная зона) при различной температуре отжига в однофазной области ( $>T_{п.п\gamma'}$ ) в интервале температур  $(T_{п.п\gamma'}+5^{\circ}\text{C})\div(T_{п.п\gamma'}+45^{\circ}\text{C})$  – рис. 4 и 5. Как видно из приведенных фотографий, уже при температуре  $T_{п.п\gamma'}+5^{\circ}\text{C}$  проходит рекристаллизация по всему сечению прутка. При этом во всем сечении прутка макроструктура равномерная (рис. 6).

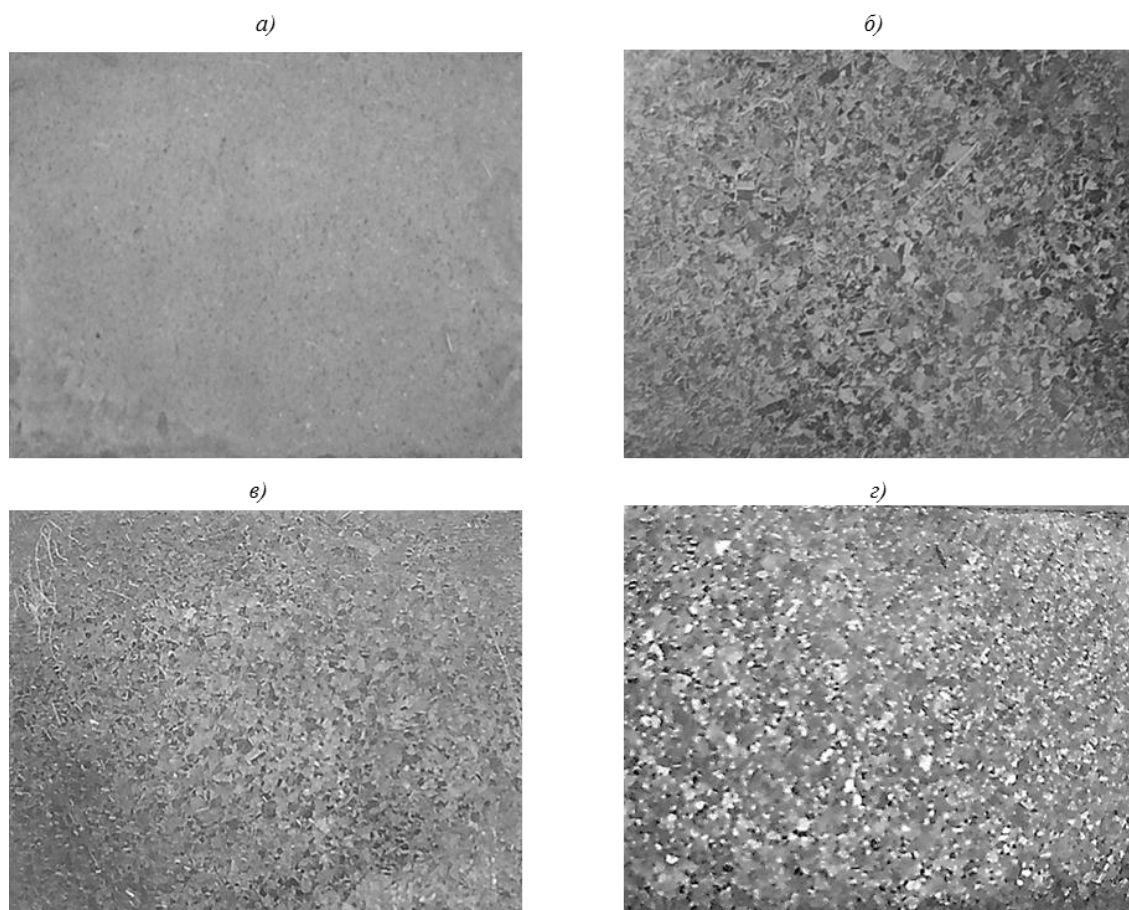


Рис. 4. Макроструктура ( $\times 5$ ) центральной части пресс-прутка  $\varnothing 150$  мм после различных температур отжига:

$a - <T_{п.п\gamma'}$ ;  $б - T_{п.п\gamma'}+5^{\circ}\text{C}$ ;  $в - T_{п.п\gamma'}+25^{\circ}\text{C}$ ;  $г - T_{п.п\gamma'}+45^{\circ}\text{C}$

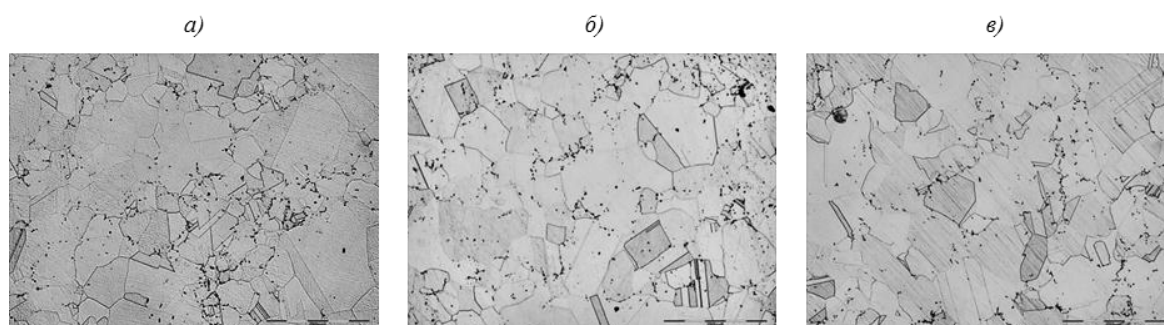


Рис. 5. Микроструктура ( $\times 100$ ) центральной части пресс-прутка  $\varnothing 150$  мм после различных температур отжига:

$a - T_{п.п\gamma'}+5^{\circ}\text{C}$ ;  $б - T_{п.п\gamma'}+25^{\circ}\text{C}$ ;  $в - T_{п.п\gamma'}+45^{\circ}\text{C}$

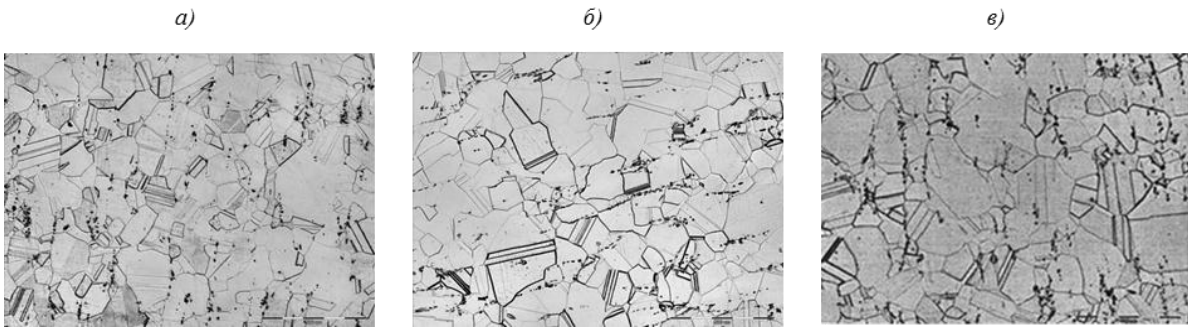


Рис. 6. Микроструктура ( $\times 100$ ) по сечению пресс-прутка после отжига при температуре  $T_{п,py}+25^{\circ}\text{C}$ :  
 а – край прутка; б – 1/2 радиуса; в – центр прутка

Для эксперимента выбрана температура  $T_{п,py}+25^{\circ}\text{C}$ , так как при этой температуре процесс рекристаллизации закончен и дальнейшее повышение температуры только приводит к росту макро- и микрзерна, что может отрицательно сказаться на уровне технологической пластичности материала.

Из трех опытных заготовок пресс-прутка  $\varnothing 150$  мм после отжига при температуре, равной  $T_{п,py}+25^{\circ}\text{C}$ , по серийной технологии изготовлены штамповки шифра ИШО-90. На рис. 7 приведена микроструктура из кольцевого припуска штамповки после окончательной термообработки ( $T_{закалки}=T_{п,py}$ ). Видно, что микроструктура штамповки однородная с преимущественным размером зерна 3–5 балла по шкале 1 (ГОСТ 5639–82).

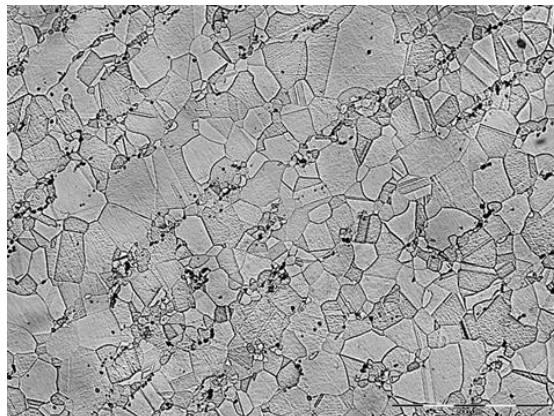


Рис. 7. Микроструктура ( $\times 100$ ) штамповки ИШО-90 (кольцевой припуск) после окончательной термообработки (температура отжига исходной заготовки перед деформацией  $T_{п,py}+25^{\circ}\text{C}$ )

В таблице приведены механические свойства по ТУ1-595-3-725–2013 опытных штамповок, определенные из кольцевых припусков. Для сравнения приведены данные по десяти серийным штамповкам, взятым из той же исходной плавки.

**Механические свойства штамповок ИШО-90 (средние значения)**

Условный номер плавки	Температура отжига перед деформацией	Количество образцов	Механические свойства при 20°C				Длительная прочность при 650°C		
			$\sigma_b$	$\sigma_{0,2}$	$\delta$	$\psi$	$KCU, \text{кДж/м}^2$	$\sigma, \text{МПа}$	$\tau, \text{ч}$
			МПа		%				
1	$T_{п,py}+25^{\circ}\text{C}$	3	1440	970	20,5	20	4,9	850	>55
	$T_{п,py}-45^{\circ}\text{C}$	10	1400	970	14,5	14,5	3,4	850	>55
2	$T_{п,py}+25^{\circ}\text{C}$	25	1430	990	18,0	17,0	4,7	850	>55
	$T_{п,py}-45^{\circ}\text{C}$	37	1400	960	15,0	14,0	3,7	850	>56
По ТУ1-595-3-725–2013			$\geq 1230$	$\geq 770$	$\geq 13$	$\geq 14$	$\geq 3,0$	850	$\geq 50$

Проверка выявленных закономерностей на большем количестве заготовок подтвердила полученные значения.

### Заключение

Проведение отжига перед деформацией при температуре на 15–25°C выше  $T_{п.р\gamma}$  позволяет повысить стабильность пластических свойств ( $\delta$ ,  $\psi$ ,  $KCU$ ) штамповок из сплава ЭП742-ИД, а также существенно снизить количество повторных испытаний и повторных термообработок.

### 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. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // *Металлы Евразии*. 2012. №3. С. 10–15.
3. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // *Интеллект & Технологии*. 2016. №2 (14). С. 41–46.
4. Оспенникова О.Г. Стратегия развития жаропрочных сплавов и сталей специального назначения, защитных и теплозащитных покрытий // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 19–36.
5. Новиков И.И. Теория термической обработки металлов. М.: *Металлургия*, 1986. 480 с.
6. Колачев Б.А., Габидуллин Р.М. Технология термической обработки цветных металлов и сплавов. 2-е изд. М.: *Металлургия*, 1992. 272 с.
7. Горелик С.С. Рекристаллизация металлов и сплавов. М.: *Металлургия*, 1978. С. 19–45.
8. Суперсплавы / под ред. Ч.Т. Симса, Н.С. Столоффа, У.К. Хагеля. М.: *Металлургия*, 1995. Т. II, кн. 1. 384 с.
9. 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.
10. Пономаренко Д.А., Скугорев А.В., Сидоров С.А., Строков В.В. Технологические возможности специализированных изотермических прессов силой 6,3 и 16 МН в производстве деталей авиационно-космического назначения // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением*. 2015. №9. С. 36–41.
11. 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 // *Труды ВИАМ: электрон. научн.-технич. журн*. 2013. №5. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.03.2018).
12. Каблов Е.Н., Голубовский Е.Р. Жаропрочность никелевых сплавов: учеб. пособие. М.: *Машиностроение*, 1998. 464 с.
13. Чабина Е.Б., Филонова Е.В., Ломберг Б.С., Бакрадзе М.М. Структура современных деформируемых никелевых сплавов // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2012. №6. С. 22–27.
14. Ломберг Б.С., Бакрадзе М.М., Чабина Е.Б., Филонова Е.В. Взаимосвязь структуры и свойств высокожаропрочных никелевых сплавов для дисков газотурбинных двигателей // *Авиационные материалы и технологии*. 2011. №2. С. 25–30.
15. Бакрадзе М.М., Овсепян С.В., Шугаев С.А., Летников М.Н. Влияние режимов закалки на структуру и свойства штамповок дисков из жаропрочного никелевого сплава ЭК151-ИД // *Труды ВИАМ: электрон. научн.-технич. журн*. 2013. №9. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.03.2018).