

УДК 621.98.043

*М.М. Бакрадзе¹, Б.С. Ломберг¹, С.А. Сидоров¹, М.В. Бубнов¹***ИЗГОТОВЛЕНИЕ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ШТАМПОВОК
ДИСКОВ ГТД ИЗ СЛИТКОВ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА
Ø320 мм СПЛАВА ЭК151-ИД**

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-6-2-2

Представлены результаты исследований по изготовлению крупных штамповок дисков из жаропрочного никелевого сплава ЭК151-ИД с использованием слитков промышленного производства диаметром 320 мм. Разработанный технологический процесс обеспечивает возможность изготовления крупных штамповок дисков из труднодеформируемых сплавов с регламентированной структурой и свойствами. В работе использовалась программа компьютерного моделирования процессов обработки металлов давлением QForm-3D.

Ключевые слова: диски ГТД, технологический процесс, жаропрочный никелевый сплав, штамповка, деформация, свойства, структура.

The article presents results of large-sized deformed turbine discs from nickel-based superalloy EK151-ID manufacturing technology development. The developed process provides the manufacturing possibility of large-sized forged discs from nickel-based superalloy with regulated structure and properties using industrial ingots with limited diameter (320 mm). Metal forming simulation engineering software QForm-3D was used in this work.

Keywords: gas turbine engines discs, technological process, superalloys, forging, deformation, properties, structure.

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

Повышение эксплуатационных характеристик авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) в значительной мере достигается за счет применения более прочных и жаропрочных конструкционных материалов для изготовления деталей и узлов ответственного назначения [1–3].

Диски турбины и последних ступеней компрессора современных ГТД являются сложнагруженными конструкциями, которые работают в условиях циклического неравномерного изменения температур и напряжений [4]. При этом ободная часть диска работает при высоких температурах, а ступичная часть – при напряжениях, близких к пределу текучести материала [5]. Кроме того, в ободе диска имеются пазы для крепления лопаток, что делает необходимым обеспечение достаточно высокой прочности при наличии надреза. Имеющиеся в диске охлаждающие отверстия и отверстия для болтов требуют повышенного сопротивления малоцикловой усталости.

Жаропрочные сплавы, применяемые для изготовления таких дисков традиционно являются труднодеформируемыми, требующими сложной многостадийной термической и термомеханической обработки [6]. Усложнение химического и фазового состава жаропрочных никелевых сплавов с целью достижения более высоких служебных характеристик вызывает значительные трудности при изготовлении из таких композиций

деформированных заготовок дисков и других деталей с применением традиционных технологий [7].

При охлаждении из γ -твердого раствора, имеющего гранцентрированную кубическую (ГЦК) решетку, выделяется когерентная γ' -фаза (интерметаллическое соединение на основе Ni_3Al), дополнительно упрочняя матрицу. Гетерофазная структура сплавов является одним из основных факторов, обеспечивающих их жаропрочность [3].

Присутствие в структуре большого количества мелкодисперсных частиц упрочняющих фаз, сохраняющих термостабильность при температурах, близких к температуре солидус, способствует резкому снижению технологической пластичности сплавов [8]. В сплавах, применяемых для дисков ГТД нового поколения, содержание основной упрочняющей γ' -фазы составляет $>45\%$ [9]. Высокая температура растворения γ' -фазы резко ограничивает температурный интервал деформации сплавов в состоянии однородного твердого раствора – особенно в условиях контакта деформируемой заготовки с менее нагретым инструментом [10]. Выделение при этом мелкодисперсных частиц γ' -фазы из пересыщенного твердого раствора вызывает охрупчивание сплава и повышает чувствительность к скорости деформации [11]. К числу таких композиций относится высокопрочный никелевый сплав ЭК151-ИД [12].

Результаты исследований, проведенных во ФГУП «ВИАМ» и направленных на совершенствование технологии изготовления штамповок из труднодеформируемых жаропрочных никелевых сплавов, позволили получить в промышленных условиях крупные заготовки дисков с высоким гарантированным уровнем свойств.

Основными контролируемыми свойствами дисков являются пределы прочности и текучести, жаропрочность, ползучесть, пластичность и сопротивление малоциклового усталости (табл. 1) [13, 14].

Таблица 1

**Свойства дисков ГТД, изготовленных
из современных жаропрочных никелевых сплавов**

Сплав	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ , %	КСУ, Дж/см ²	Жаропрочность, МПа			МЦУ: σ_0 , МПа (при $N=10^4$ цикл и 650°C) для образцов	
	МПа				$\sigma_{100}^{650^\circ}$	$\sigma_{1000}^{650^\circ}$	$\sigma_{100}^{750^\circ}$	гладких	с надрезом ($r=0,25$ мм)
ЭК151-ИД	1584*	1153*	16,5*	$\geq 37^*$	1035	890	655	1100	500
ВЖ175	1630	1215	14	38	1070	–	650	1300	510
ЭП741НП	1560	1020	19	40	1020	877	630	1020	500
N18	1580	1125	25	–	1000	850	–	–	–
Rene 88DT	1548	1147	21	–	951	860	–	–	–

* Средние значения по статистике АО «СМК» (~100 штамповок).

Все перечисленные свойства являются структурно-чувствительными. Поэтому для достижения требуемого комплекса свойств необходимо управлять процессами формирования структуры на всех стадиях изготовления заготовок дисков: выплавки и последующего переплава в вакуумной печи, деформации и термической обработки. Отклонения от установленной технологии могут приводить к возникновению в материале дисков различных видов структурной неоднородности и дефектов.

Наиболее часто встречающиеся структурные дефекты в заготовках дисков из жаропрочных сплавов – инородные включения («корона», «корольки», шлак), зональная ликвация (пятнистая и внеосевая), ликвация упрочняющей γ' -фазы, карбидная и карбонитридная ликвация.

Неоднородность распределения γ' -фазы в жаропрочных сплавах на никелевой основе является следствием дендритного характера кристаллизации слитков, что

сильно затрудняет управление процессами выделения и характером распределения γ' -фазы в структуре на всех этапах технологического процесса получения штамповок дисков. Установлено, что выделения γ' -фазы в литом материале весьма неоднородны по химическому составу – с сильным обогащением γ' -образующими элементами.

Изучение взаимосвязи структуры и свойств штамповок дисков промышленного производства из сплавов ЭИ698-ВД, ЭП742-ИД и др. показало, что дендритная неоднородность приводит к полосчатому распределению частиц γ' -фазы, а неудовлетворительная технология получения деформированных заготовок под штамповку (цикл: нагрев–ковка) может вызвать образование областей, не содержащих выделений частиц γ' -фазы. Такой материал проявляет чувствительность к надрезу при испытаниях на длительную прочность и имеет низкую технологичность.

Карбидная и карбонитридная ликвация в свою очередь оказывает значительное влияние на большинство эксплуатационных свойств сплавов. Первичные карбиды или карбонитриды (типа MC или MCN) в процессе затвердевания выделяются в виде эвтектических составляющих в межосных участках. При горячей деформации они ориентируются в направлении течения металла и образуют строчечные скопления включений, количество и размер которых зависят от содержания углерода в сплаве и режимов последующей термомеханической обработки.

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») [15].

Материалы и методы

Выплавку слитков сплава ЭК151-ИД проводили в промышленных условиях АО «МЗ «Электросталь» в однотонной вакуумной индукционной печи типа ИСВ-1,0 и в 2,5-тонной вакуумной индукционной печи типа ИСВ-2,5 с последующим вакуумным дуговым переплавом в слитки $\varnothing 320$ мм в печи ДСВ-4,5 с охлаждением гелием.

Подпрессовку и прессование слитков проводили в промышленных условиях АО «МЗ «Электросталь» на горизонтальном прессе с усилием 63 МН производства Уральского завода тяжелого машиностроения (УЗТМ).

Прессованные заготовки деформировали в условиях АО «СМК» на гидравлическом прессе с усилием 100 МН (УЗТМ). Скорость рабочего хода пресса составляла 40 мм/с.

Промежуточные отжиги и окончательную термообработку проводили в камерных электропечах типа СНВ в промышленных условиях АО «СМК». Контроль микроструктуры (размер зерна) проведен по ГОСТ 5639.

Испытания на кратковременную прочность, определение модуля упругости при растяжении проводили по ГОСТ 9651 и ГОСТ 1497 на образцах, вырезанных из трех зон штамповки – ступицы, полотна и обода (по три образца на каждую температуру).

Испытания на длительную прочность с записью деформации ползучести проводили на машинах ZST2/3-ВИЭТ с компьютерной системой управления в соответствии с ГОСТ 10145 и ГОСТ 3248. Для построения зависимостей испытывали по 15 образцов при каждой температуре на трех уровнях напряжений. Пределы длительной прочности и ползучести определяли на базах 100 и 500 ч.

Испытания на длительную прочность образцов с надрезом ($r_n=0,15$ мм) проводили по ОСТ1-90294 при двух температурах (по 10 образцов на каждое испытание).

Проверку макроструктуры штамповки проводили на соответствие требованиям ТУ1-801-5324–2005.

Результаты

Выплавка исходных заготовок

Выплавку слитков из сплава ЭК151-ИД для изготовления прессованных прутков проводили по технологии, принятой в серийном производстве полуфабрикатов из этого материала в АО «МЗ «Электросталь». Процесс выплавки включал вакуумную индукционную плавку и последующий вакуумный дуговой переплав (ВИ+ВДП). Такой процесс способствует получению плотных слитков с минимальным количеством микропор, устранению ликвационной неоднородности и высокой чистоте металла по примесям.

Гомогенизационный отжиг слитков ВДП проведен по усовершенствованному режиму, который обеспечивает: полное растворение избыточных фаз, присутствующих после выплавки слитка; однородное укрупнение частиц γ' -фазы в осях и межосных пространствах; расширение температурного интервала динамической рекристаллизации, а также формирование однородной ультрамелкозернистой структуры после деформации (<10 мкм).

Деформация

С целью увеличения диаметра и улучшения структуры заготовки проводили деформацию с помощью операции подпрессовки слитка в контейнере. После подпрессовки заготовку подвергали рекристаллизационному отжигу, обеспечивающему устранение наследственных литых зерен.

Цель промежуточных отжигов при температуре двухфазной области – снижение остаточных напряжений с сохранением мелкозернистой структуры для повышения механической обрабатываемости поверхности заготовок и пластичности материала перед последующей термомеханической обработкой.

Таким образом, технологическая схема деформации для изготовления прутков из жаропрочного никелевого сплава ЭК151-ИД включала: подпрессовки для увеличения диаметра заготовки с последующей обдиркой заготовки, прессование на пруток, последующие подпрессовки с обдиркой заготовки на требуемый диаметр.

Дальнейшую деформацию подпрессованных заготовок из сплава ЭК151-ИД осуществляли в условиях АО «СМК». Технологическая схема деформации включала: осадку, предварительную и окончательную штамповку за две операции.

С целью оптимизации технологического процесса изготовления штамповок в программе QForm-3D проведено компьютерное моделирование процесса деформации жаропрочного никелевого сплава ЭК151-ИД. В рамках этой программы разработаны два варианта процесса с учетом различной массы исходной заготовки. Оба варианта обеспечивали формоизменение заготовки с получением штамповки требуемых геометрических размеров. Наиболее экономичный вариант выбран по массе исходной заготовки.

Для осуществления моделирования процесса деформации в программу QForm-3D дополнительно введены следующие необходимые параметры (характеристики прессы с усилием 10000 тс): минимальное и максимальное усилия прессы, скорость подвижной траверсы при рабочем ходе, температура бойков и штампа, материал бойков и штампа, время переноса заготовки от печи к прессу, скорость деформирования на операциях осадки и штамповки, материал смазки для уменьшения коэффициента трения, время установки заготовки на плоские бойки или в штамп, температура деформации при осадке, температура конца деформации, время деформирования, температура деформации в штампе, температура конца деформации, продолжительность деформирования.

Результаты компьютерного моделирования в программе QForm-3D представлены на рис. 1 и 2. На рис. 1 показано распределение температуры в объеме исходной заготовки, перемещенной из печи в штамп, нагретый до температуры 500°C.

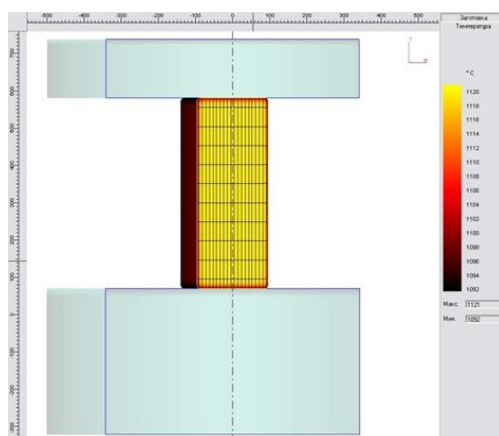


Рис. 1. Исходная заготовка для изготовления штамповки из сплава ЭК151-ИД

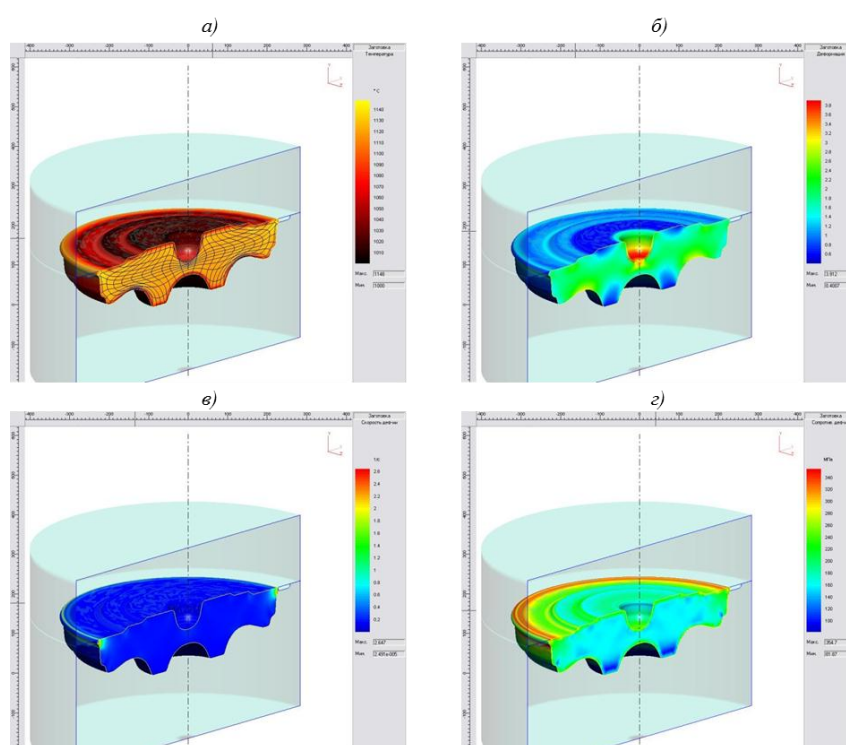


Рис. 2. Параметры процесса деформации штамповки диска из сплава ЭК151-ИД:

а – распределение температуры и лагранжевая сетка; *б* – распределение деформации; *в* – интенсивность скоростей деформации; *г* – распределение удельных усилий

При переносе из печи в штамп, в заготовке создается неравномерность температуры, которая находится пределах 1092–1121°C, и, как следствие – разнопрочность по объему, неблагоприятно влияющая на процесс течения металла при деформации. В процессе деформации неравномерность температуры в объеме заготовки изменяется как вследствие теплообмена, так и за счет теплового эффекта, дополнительно способствуя неравномерности деформации. На конечной стадии деформации неравномерность температуры составляет уже 1000–1148°C (рис. 2, *а*). Неравномерность деформации оказывает влияние на формирование структуры и характер текстуры. На рис. 2, *б* отчетливо выделяются зоны затрудненной и интенсивной деформации, анализ которых позволяет корректировать форму штампового инструмента, а также прогнозировать неравномерность свойств в объеме деформированной заготовки после окончательной термообработки. Полезными являются также полученные в работе данные по

интенсивности скоростей деформации и распределению удельных усилий на гравюре штампа (рис. 2, в, з), которые позволяют выявлять зоны наибольшего нагружения и износа штампа и использовать эти данные при конструировании штамповой оснастки, а также при расчете каждой операции штамповки. Полученные штамповки не имели поверхностных дефектов – трещин, заковок и др.

Термическая обработка

Полученные в ходе проведенной работы штамповки из жаропрочного никелевого сплава ЭК151-ИД прошли окончательную упрочняющую термическую обработку, включающую закалку и старение.

Для оптимизации термической обработки проведено исследование микроструктуры образцов, вырезанных из кольцевого припуска экспериментальных заготовок, после заковки с различных температур ниже и выше температуры полного растворения γ' -фазы ($T_{п.р\gamma'}$) (рис. 3). В соответствии с температурой $T_{п.р\gamma'}$, после оценки микроструктуры сплава (балл зерна, равномерность распределения зерен, размер частиц γ' -фазы) выбраны и опробованы различные варианты термической обработки заготовок дисков из деформируемого жаропрочного никелевого сплава ЭК151-ИД.

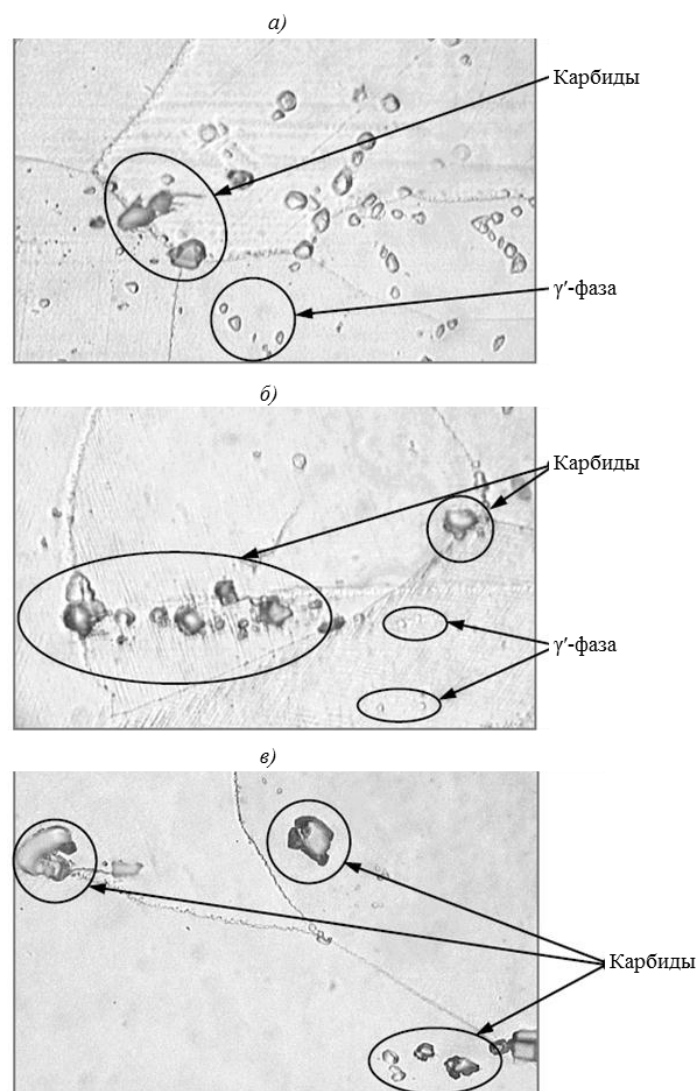


Рис. 3. Микроструктура ($\times 1000$) сплава ЭК151-ИД после заковки при температурах 1150 (а), 1160 (б) и 1170°C (в) с выдержкой 1 ч и охлаждением на воздухе

В результате исследований установлен оптимальный режим термической обработки: выдержка при $T_{п.γ'}$ -(30–40)°С, нагрев до $T_{п.γ'}$ -(10–20)°С и выдержка при этой температуре, охлаждение на воздухе, затем выдержка при 850±10°С, охлаждение на воздухе и выдержка при 760±10°С с охлаждением на воздухе. Микроструктура сплава при термообработке по этому режиму характеризуется равномерным распределением зерен 5–6 балла и частиц $γ'$ -фазы.

Структура и механические свойства штамповок

Проведен контроль микроструктуры штамповок после термической обработки по оптимальному режиму. Установлено, что структура сплава равномерная, размер зерна соответствует 5–6 баллу. Макроструктура не имеет свищей, трещин, расслоений, усадочной раковины, скоплений грубых пор, «короны» и других инородных включений, видимых невооруженным глазом (рис. 4).



Рис. 4. Макроструктура штамповки из сплава ЭК151-ИД

Несмотря на сложную форму и большую массу штамповки (177 кг), свойства при растяжении образцов из ступицы, полотна и обода находятся на одном уровне.

Термообработка с закалкой при $(T_{п.γ'}$ -(10–20))±10°С обеспечивает повышенную по сравнению с нормами ТУ1-801-5324–2005 кратковременную прочность, при сохранении остальных свойств на уровне ТУ и паспортных значений (табл. 2).

Таблица 2

Свойства сплава ЭК151-ИД

Вид полуфабриката	$T_{исп}$, °С	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ , %	КСУ, МДж/м ²	σ_{100}	σ_{500}	σ_0 , МПа (на базе 10 ⁴ цикл)
		МПа				МПа		
Штамповка $\varnothing 605$ мм (масса 177 кг)	20	1537	1060	17,8	0,37	–	–	–
	550	–	–	–	–	1300	1250	–
	650	1448	1007	16,3	0,40	1010	940	1120
	750	–	–	–	0,41	650	540	–
Нормы по ТУ1-801-5324–2005	20	1450	1050	13,0	0,30	–	–	–
	650	–	–	–	–	1030	–	–

Заключения

Впервые изготовлены крупногабаритные штамповки дисков из труднодеформируемого гетерофазного сплава ЭК151-ИД с регламентированной однородной структурой (рис. 5).

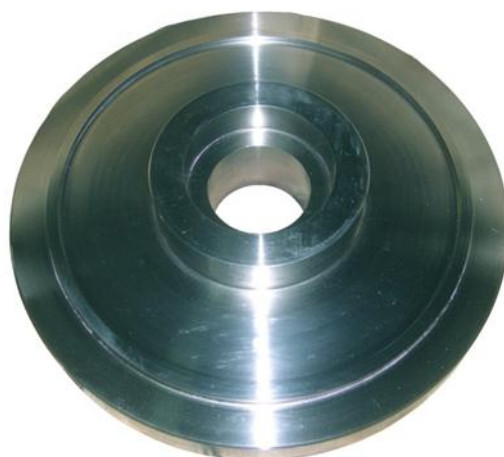


Рис. 5. Заготовка диска газотурбинного двигателя из сплава ЭК151-ИД после механической обработки

Оптимизацию схемы деформации технологического процесса осуществляли с помощью компьютерного моделирования.

Оптимизирована технология термической обработки штамповок дисков из сплава ЭК151-ИД, обеспечивающая формирование равномерной структуры и высокий уровень механических свойств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Складов Н.М. Путь длиной в 70 лет – от древесины до суперматериалов / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: МИСИС–ВИАМ, 2002. С. 317–319.
2. История авиационного материаловедения. ВИАМ – 80 лет: годы и люди / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2012. С. 245–248.
3. Каблов Е.Н., Голубовский Е.Р. Жаропрочность никелевых сплавов: учеб. пособие. М.: Машиностроение, 1998. 464 с.
4. 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.
5. Каблов Е.Н., Ломберг Б.С., Оспенникова О.Г. Создание современных жаропрочных материалов и технологий их производства для авиационного двигателестроения // Крылья Родины. 2012. №3–4. С. 34–38.
6. 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.
7. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Комплексная инновационная технология изотермической штамповки на воздухе в режиме сверхпластичности дисков из супержаропрочных сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 129–141.
8. Ломберг Б.С., Горин В.А., Герасимов Д.Е., Рахманов Н.С., Степанов В.П. Высокожаропрочные деформируемые никелевые сплавы для дисков ГТД и технология их производства // Технология легких сплавов, 1993. №7–8. С. 54–63.
9. Разуваев Е.И., Бубнов М.В., Бакрадзе М.М., Сидоров С.А. ГИП и деформация гранулированных жаропрочных никелевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2016. №S1. С. 80–86. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S1-80-86.
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. Разуваев Е.И., Бубнов М.В., Григорьева Г.А., Сидоров С.А. Развитие и практическое применение физико-химической теории в процессах обработки давлением авиационных сталей и сплавов // *Новости материаловедения. Наука и техника: электрон. науч.-технич. журн.* 2015. №1. Ст. 07. URL: <http://www.materialsnews.ru> (дата обращения: 23.02.2017).
12. 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. науч.-технич. журн.* 2013. №9. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.02.2017).
13. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения // *Авиационные материалы и технологии.* 2012. №S. С. 36–52.
14. Разуваев Е.И., Моисеев Н.В., Капитаненко Д.В., Бубнов М.В. Современные технологии обработки металлов давлением // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2015. №2. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.02.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-2-3-3.
15. 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.