

УДК 621.7.043:669.018.44

*Д.А. Пономаренко<sup>1</sup>, А.В. Скугорев<sup>1</sup>, Т.Ю. Кин<sup>1</sup>, А.С. Шпагин<sup>1</sup>***ШТАМПОВКА ЗАГОТОВОК ДИСКОВ ТУРБИНЫ  
МАЛОГАБАРИТНЫХ ГТД ИЗ СЛИТКОВ СПЛАВА ЭП742-ИД  
НА ИЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПРЕССАХ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-8-9-17

*Работа посвящена получению деформированной заготовки диска турбины малогабаритного газотурбинного двигателя (ГТД) непосредственно из слитка вакуумно-дугового переплава (ВДП) жаропрочного никелевого сплава ЭП742-ИД с использованием метода изотермической деформации на воздухе. Показана принципиальная возможность получения качественных заготовок дисков турбины малогабаритных ГТД при использовании в качестве исходной заготовки слитка ВДП вместо предварительно деформированной (кованой или прессованной) заготовки. Предложенная технологическая схема может быть использована для изготовления штамповок дисков малогабаритных ГТД из других марок жаропрочных сплавов.*

**Ключевые слова:** жаропрочный никелевый сплав, изотермическая штамповка, технология, слиток вакуумно-дугового переплава (ВДП), диск турбины.

*D.A. Ponomarenko<sup>1</sup>, A.V. Skugorev<sup>1</sup>, T.Yu. Kin<sup>1</sup>, A.S. Shpagin<sup>1</sup>***FORGING OF BLANKS OF TURBINE DISKS  
OF SMALL-SIZE GAS TURBINE ENGINES FROM VAR-INGOTS  
OF ALLOY EP742-ID BY USING ISOTHERMAL PRESSES**

*The work is dedicated to obtaining deformed blank of turbine disk of small-size gas turbine engine immediately from vacuum-arc remelted ingot (VAR-ingot) of heat-resistant nickel-based alloy EP742-ID using the method of isothermal deformation. Principal possibility of obtaining quality blank of turbine disk with use of VAR-ingot as primary blank instead pre-deformed one (forged or pressed blank) is shown. Proposed technological scheme can be used for production of blank disks of small-size gas turbine engines from other grades of heat-resistant alloys.*

**Keywords:** heat-resistant nickel-based alloys, isothermal forging, vacuum-arc remelted ingot (VAR-ingot), turbine disk.

<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 отличие от производства крупногабаритных штамповок дисков ГТД на мощных гидравлических прессах, в серийном производстве дисков малогабаритных ГТД из высокожаропрочных никелевых сплавов в качестве исходной заготовки используют не слиток, а предварительно деформированные полуфабрикаты (кованные или прессованные прутки). Многолетний опыт работы ФГУП «ВИАМ» по изготовлению штампованных заготовок дисков из прессованных прутков сплава ЭП742-ИД на специализированных изотермических прессах [1–3] показал, что хотя партии прутка различных плавок и удовлетворяют требованиям технических условий производителя, но недостаточно стабильны как по структурному состоянию, так и по показателям механических свойств [4]. Это привело к введению в серийный технологический процесс дополнительных операций, направленных на улучшение структурного состояния заготовок перед

формообразующими операциями. Такие операции осуществляют на специализированном гидравлическом прессе методом свободной ковки на плоских бойках или в специальном штамповом инструменте в условиях, приближенных к изотермическим [5]. Предварительная ковка заготовок, которую позволяет осуществлять нагрев штампов до температуры не менее 950°C, повышает стабильность свойств окончательно отштампованных дисков, но также существенно увеличивает трудоемкость процесса их изготовления. Другим недостатком использования в технологическом процессе прессованного прутка является его высокая стоимость, устанавливаемая крупными металлургическими предприятиями. Статистические данные показывают, что цена полуфабриката со временем увеличивается в геометрической прогрессии [6]. Эти два фактора – необходимость введения в технологический процесс дополнительных трудоемких операций для улучшения структурного состояния исходных заготовок и постоянно возрастающая цена закупаемого у сторонней организации полуфабриката – снижают эффективность производства и обуславливают необходимость поиска альтернативных вариантов для замены прессованного прутка.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 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») [7].

### **Материалы и методы**

#### ***Получение заготовок дисков малогабаритных ГТД из слитков ВДП***

Альтернативным вариантом изготовления штампованных заготовок дисков малогабаритных ГТД является использование в качестве исходной заготовки слитков вакуумно-дугового переплава (ВДП). Слитки ВДП могут стать альтернативой прессованному прутку, производство которого в РФ достаточно энергозатратно и локализовано, что позволит расширить круг поставщиков исходной металлопродукции. Становится также более доступной организация малотоннажных производств заготовок дисков ГТД по полному циклу, где процесс изготовления штамповок дисков от шихтовых материалов до получения штампованной заготовки и ее контроля остается в компетенции одного предприятия, что положительным образом скажется на качестве продукции.

Для выполнения работы на установке ALD VAR L-200 изготовлены слитки ВДП из сплава ЭП742-ИД диаметром 130 мм. По химическому составу и макроструктуре изготовленные слитки соответствуют действующей нормативно-технической документации. Диаметр используемых слитков сопоставим с диаметром прессованного прутка, используемого при серийном производстве штамповок дисков малогабаритных ГТД во ФГУП «ВИАМ». Полученные слитки разрезали на мерные заготовки для изготовления опытных штамповок. По геометрическим размерам и техническим требованиям опытные заготовки полностью соответствовали штампованным заготовкам дисков турбины из сплава ЭП742-ИД, изготавливаемым ФГУП «ВИАМ» для нужд отечественной двигателестроительной промышленности.

Процесс изготовления опытных заготовок дисков ГТД из слитков ВДП включает четыре основные стадии:

- получение слитков и резка на мерные литые заготовки;
- получение из литой заготовки посредством ковочного передела на изотермическом прессе в специальном штамповом инструменте поковки с подготовленной структурой и оптимальной геометрической формой;
- окончательная штамповка точной заготовки диска;
- термическая обработка по режимам, используемым в серийном производстве.

Передел слитков труднодеформируемых сплавов в полуфабрикат с однородной мелкозернистой структурой имеет крайне важное значение, так как значительно повышает технологическую пластичность заготовок, необходимую для формообразования заготовки на штамповочных операциях с минимальным числом штамповых переходов и получения стабильных механических свойств в окончательных штамповках после термической обработки [4].

Для определения основных характеристик технологической пластичности сплава ЭП742-ИД в литом состоянии после гомогенизационного отжига проведены испытания на растяжение при повышенных температурах по ГОСТ 9651–84. Испытания образцов проводили на электромеханической испытательной машине 1958У-10-1 при температурах 900–1100°C и скоростях деформирования 1, 10 и 100 мм/мин (рис. 1). Анализ полученных зависимостей показал целесообразность проведения начальных этапов деформации со степенью не более 20% в интервале температур, соответствующих области максимальной пластичности сплава.

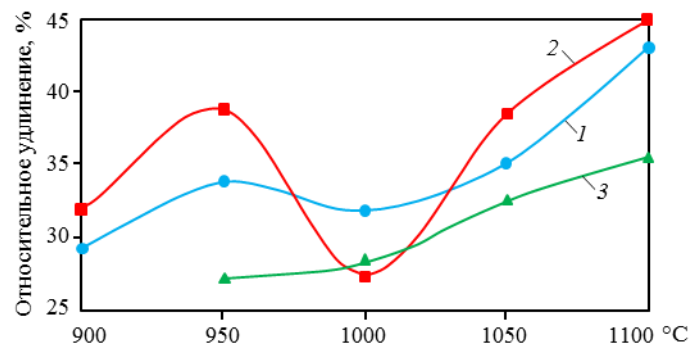


Рис. 1. Зависимости относительного удлинения после растяжения образцов из слитка сплава ЭП742-ИД от температуры при скорости испытания 1 (1), 10 (2) и 100 мм/мин (3)

Для предварительной проработки литой структуры исходной заготовки использованы традиционные способы деформационной обработки слитков – осадка на плоских штампах, подпрессовка в закрытом контейнере и всесторонняя ковка. Все операции выполнены на специализированных гидравлических прессах с усилием 630 и 1600 тс с индукционными нагревательными установками универсальных штамповых блоков, изготовленных преимущественно из литейного жаропрочного никелевого сплава, что позволяет проводить процесс без защитной атмосферы (на воздухе) [8, 9].

Использование метода изотермической штамповки, при котором температура штампового инструмента приближена к температуре деформируемой заготовки, значительно расширяет возможности как формообразования исходной заготовки, так и формирования в ней оптимальной структуры для получения требуемого комплекса механических свойств после термической обработки [10, 11]. При этом отсутствие существенного остывания деформируемой заготовки в штамповом инструменте позволяет использовать маловесную исходную заготовку и обеспечить повышенный коэффициент использования материала.

В процессе изготовления штамповок дисков из литых заготовок проведен ряд деформационных операций.

#### *Первая деформация*

Под деформацию на плоских штампах исходные заготовки с литой структурой подготовлены с торцевыми стальными накладками толщиной 6 мм и теплоизоляцией на боковой поверхности из каолиновой ваты, что обеспечило высокую стабильность

температуры заготовки и максимальную равномерность деформации по объему. После первой деформации заготовки имели форму, близкую к цилиндрической. После деформации проведен гомогенизационный отжиг и дробеструйная обработка поверхности заготовок.

*Вторая деформация*

Для второй деформации использован закрытый цилиндрический контейнер с рабочей частью диаметром 155 мм и профильными пресс-шайбами (рис. 2). Перед нагревом под деформацию на заготовки нанесено защитное технологическое покрытие ЭВТ-24 [12].

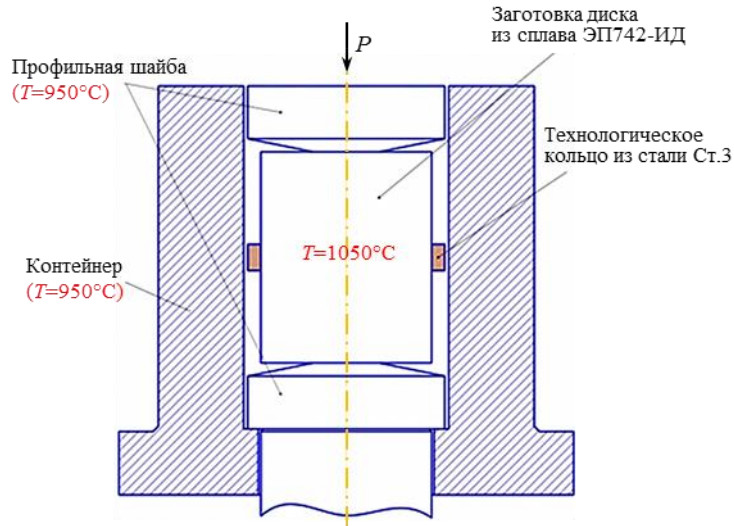


Рис. 2. Схема деформации заготовки диска в закрытом контейнере с профильными пресс-шайбами

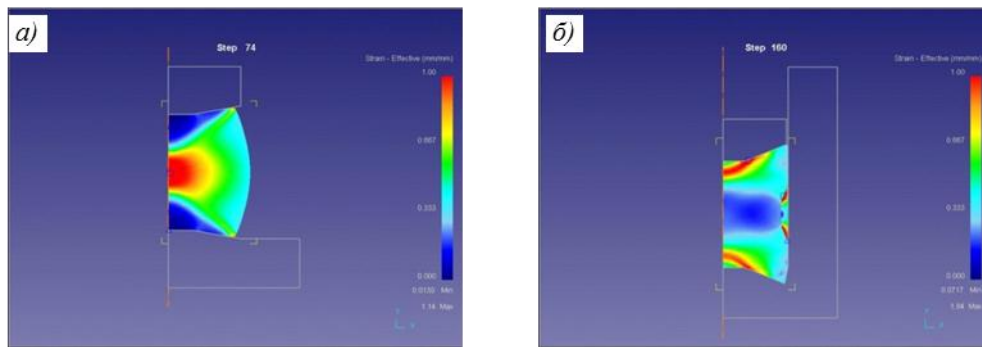


Рис. 3. Результаты компьютерного моделирования операций подпрессовки заготовки диска в закрытом контейнере:

*a* – без центровочного кольца; *б* – с центровочным кольцом

Для центровки заготовок в контейнере в начальный момент деформации, а также дополнительной проработки структуры боковых зон затрудненной деформации, использовано стальное технологическое кольцо, помещенное на боковую поверхность заготовки. Компьютерное моделирование процесса в программном комплексе QForm [13–15] показало, что после деформации в контейнере по предложенной схеме зоны затрудненной деформации в заготовке выражены незначительно (рис. 3, б). В отличие от свободной осадки (рис. 3, а) зона наименьшей деформации находится не в торцевых зонах, а в центральной части заготовки. Стенки контейнера препятствуют радиальному течению металла, создают условия всестороннего сжатия на конечном этапе

и способствуют более равномерному распределению деформации по объему заготовки. После деформации в контейнере и удаления деформированного технологического кольца, заготовки приобрели характерную форму, приближенную к зонам интенсивного течения металла (рис. 4). После пескоструйной обработки заготовок проведен промежуточный отжиг.



Рис. 4. Заготовка диска после подпрессовки в контейнере

#### *Третья деформация*

После подпрессовки в закрытом контейнере заготовки приобрели технологическую пластичность, которая позволила проводить свободную ковку на плоских штампах, нагретых до 950°C, с целью дальнейшей проработки структуры по всему объему заготовки и получения оптимальной геометрической формы, необходимой для дальнейшего формообразования в штамповом инструменте. После ковки заготовки имели форму, приближенную к цилиндрической, и были подвергнуты промежуточному отжигу.

Окончательное формообразование штамповок дисков проведено за два штамповых перехода в условиях, приближенных к изотермическим, с использованием защитного технологического покрытия ЭВТ-24, которое также является эффективным смазочным средством при изотермической штамповке [12, 16].

#### *Методы исследований штампованных заготовок*

После деформации одну из опытных штамповок разрезали на образцы для исследования макро- и микроструктуры. Оценку макроструктуры проводили на поперечном макрошлифе в соответствии с ГОСТ 22838–77 (шкала 6) с помощью инвертированного оптического микроскопа Axio Vert.A1 фирмы Carl Zeiss. Микроструктуру оценивали в центральной зоне заготовки, характеризуемой низкой степенью проработки структуры в соответствии с ГОСТ 21073.1–75. На этой же заготовке проведены полная термическая обработка по стандартному режиму и всесторонние испытания механических свойств в соответствии с действующей нормативно-технической документацией на аналогичные штампованные заготовки.

Вторую опытную заготовку после термической обработки подвергали ультразвуковому контролю на автоматизированной ультразвуковой иммерсионной установке LS-500 LP с использованием преобразователей: ультразвукового иммерсионного Olympus C306SU с центральной частотой 2,25 МГц и фокусированного Olympus C305SU с центральной частотой 5 МГц, а также комплекта контрольных образцов

для УЗ-контроля дисков турбин и компрессоров для авиадвигателей [17–19]. Механические свойства второй опытной заготовки определяли на образцах, вырезанных из технологического припуска. Испытание на одноосное растяжение (кратковременный разрыв) проводили на электромеханической универсальной разрывной машине KARRA 50DS в соответствии с требованиями ГОСТ 1497–84. Испытание на длительную прочность по ГОСТ 10145–81 проводили на испытательной машине ZST 2/3 ВИЭТ, включенной в состав высокотемпературного автоматизированного испытательного комплекса (ВАИК). Испытание на ударный изгиб с определением ударной вязкости разрушения образцов (*KCU*) проводили на маятниковых копрах ПСВО-30 и Walter Bai PH300-CHV в соответствии с ГОСТ 9454–78. Измерение твердости по Бринеллю проводили на универсальном твердомере DuraVision 300 по ГОСТ 9012–59 на образцах для испытаний на ударный изгиб. После проведения испытаний вторая опытная заготовка передана заказчику для проведения испытаний в составе двигателя [20, 21].

### Результаты и обсуждение

Макроструктура поперечного темплета матовая, однородная (рис. 5); пустот, свищей, трещин, расслоений, усадочной рыхлоты, скоплений пор и инородных включений, видимых невооруженным глазом, не обнаружено. В соответствии с ГОСТ 22838–77 величина макрозерна соответствует 1 баллу. Микроструктура штампованной заготовки диска до и после термической обработки представлена на рис. 6. Микроструктура до термической обработки равномерная с коагулированными выделениями частиц  $\gamma'$ -фазы. После термической обработки структура сплава равномерная, в структуре присутствует некоторое количество двойников, величина зерна соответствует 3–4 номеру по шкале микроструктур ГОСТ 21073.1–75.



Рис. 5. Макроструктура заготовки диска из сплава в деформированном состоянии

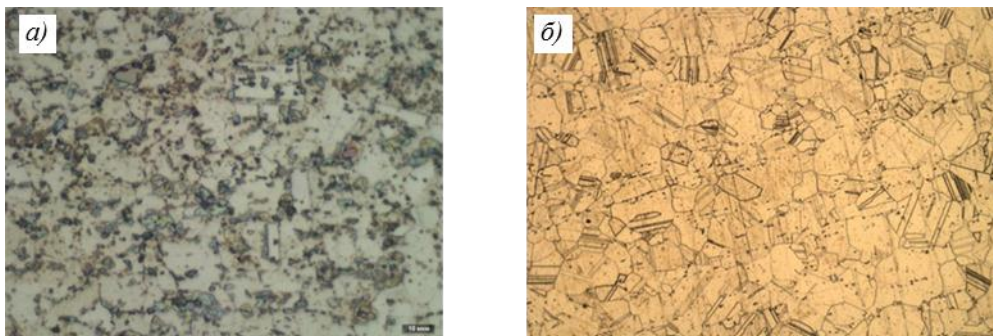


Рис. 6. Микроструктура шлифов из тела штамповки диска до (а) и после термической обработки (б)

В табл. 1 и 2 приведены результаты испытаний механических свойств образцов, вырезанных из разных зон опытных штампованных заготовок.

Таблица 1

**Механические свойства при температуре 20°C  
образцов из различных зон опытных штамповок**

Зона вырезки образца	Ориентация образца	$\sigma_b$	$\sigma_{0.2}$	$\delta$	$\psi$	КСУ, Дж/см <sup>2</sup>	Твердость НВ ( $d_{отп}$ ), мм
		МПа		%			
Тело штамповки	Тангенциальное (хордовое)	1470	1080	20	21	51,3	3,04
	Радиальное	1360	960	16	16,5	34,1	3,14
Технологический (кольцевой) припуск	Тангенциальное (хордовое)	1480	1070	23	30	52,9	3,07
Требования по техническим условиям		$\geq 1210$	$\geq 755$	$\geq 13$	$\geq 14$	$\geq 29,3$	3,0–3,4

Таблица 2

**Результаты испытаний образцов из различных зон опытных штамповок на длительную прочность при температуре испытания 650°C**

Зона вырезки образца	Ориентация образца	Показатели длительной прочности	
		постоянно приложенное напряжение, МПа	время до разрушения, ч
Тело штамповки	Тангенциальное (хордовое)	834	110*
	Радиальное		110*
Технологический (кольцевой) припуск	Тангенциальное (хордовое)		110*
Требования по техническим условиям		834	$\geq 50$

\* Образцы сняты без разрушения.

Полученный уровень механических свойств материала опытных штампованных заготовок значительно превышает требования технических условий на соответствующие штамповки, изготавливаемые в серийном производстве. Таким образом, предложенная технология термомеханической обработки обеспечивает необходимую проработку литой структуры и позволяет получать заготовки с высоким уровнем механических свойств. Предложенная технологическая схема может быть использована для изготовления штамповок из труднодеформируемых жаропрочных сплавов, для которых в качестве исходной заготовки используется прессованный пруток (ЭК79-ИД, ЭК151-ИД, ЭП975-ИД, ВЖ175-ИД) [22]. При наличии на производстве специализированных изотермических прессов данные технологические решения могут быть применимы для заготовительно-го производства машиностроительных предприятий, специализирующихся на выпуске малогабаритных ГТД и установок.

**Заключения**

Показана принципиальная возможность получения штампованных заготовок дисков турбины малогабаритных ГТД из слитков ВДП собственной выплавки с использованием изотермической деформации на воздухе. Предложенная схема деформации слитка позволяет обеспечить необходимую проработку литой структуры в малогабаритной заготовке и получить высокий уровень механических свойств заготовки диска турбины ГТД.

Разработанная схема термомеханической обработки может быть использована для изготовления заготовок дисков малогабаритных ГТД из труднодеформируемых жаропрочных сплавов, для изготовления которых обычно используется прессованный пруток, что, в свою очередь, позволяет повысить локализацию производства.

Предложенная технологическая схема применима для деформационной обработки новых деформируемых жаропрочных сплавов для неохлаждаемых деталей ГТД (диски турбины, покрывные диски, корпусные детали).

## ЛИТЕРАТУРА

1. 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. №S. С. 129–141.
2. Оспенникова О.Г. Итоги реализации стратегических направлений по созданию нового поколения жаропрочных литейных и деформируемых сплавов и сталей за 2012–2016 гг. // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 17–23. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-17-23.
3. 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: 14.05.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-2-3-3.
4. Пономаренко Д.А., Летников М.Н., Скугорев А.В., Сидоров С.А. Использование специализированных изотермических прессов дляковки заготовок дисков турбины из труднодеформируемых жаропрочных сплавов // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. 2018. №3. С. 19–25.
5. 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 авиационного назначения // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. 2015. №9. С. 36–41.
6. Каблов Е.Н. Маркетинг материаловедения, авиастроения и промышленности: настоящее и будущее // *Директор по маркетингу и сбыту*. 2017. №5–6. С. 40–44.
7. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // *Крылья Родины*. 2016. №5. С. 8–18.
8. Бубнов М.В., Сидоров С.А., Баженов А.Р., Чеботарева Е.С. Развитие теории и практики производства штамповок дисков ГТД из гетерофазных жаропрочных никелевых сплавов // *Новости материаловедения. Наука и техника: электрон. науч.-технич. журн.* 2017. №2 (26). Ст. 02. URL: <http://www.materialsnews.ru> (дата обращения: 14.05.2019).
9. Разуваев Е.И., Бакрадзе М.М., Капитаненко Д.В., Сидоров С.А. Технологии изготовления деформированных полуфабрикатов непосредственно из расплава, полужидкого состояния или непрерывнолитой заготовки // *Сталь*. 2016. №2. С. 67–71.
10. Бакрадзе М.М., Волков А.М., Шестакова А.А., Летников М.Н., Бубнов М.В. Особенности изменения размера зерен в дисковом гранулируемом жаропрочном никелевом сплаве, произведенном по различным технологиям // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2018. №2 (62). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 31.03.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-2-1-1.
11. Изаков И.А., Капитаненко Д.В., Бубнов М.В., Баженов А.Р. Исследование параметров технологических процессов изотермического деформирования // *Новости материаловедения. Наука и техника: электрон. науч.-технич. журн.* 2016. №5 (23). Ст. 04. URL: <http://www.materialnews.ru> (дата обращения: 01.04.2019).
12. Розененкова В.А., Солнцев С.С., Миронова Н.А., Гаврилов С.В. Стеклокерамические композиционные защитные технологические покрытия для термомеханической обработки интерметаллидных сплавов // *Стекло и керамика*. 2016. №10. С. 32–36.
13. Стебунов С.А., Бочаров Ю.А. Сертификация авиационных поковок на основе моделирования процессов в программе QForm // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. 2011. №6. С. 33–35.
14. Носов В.К., Кононов С.А., Перевозов А.С. и др. Реологические свойства сплава ЭП742-ИД в контексте интегрированного вычислительного материаловедения и инжиниринга (ICME). Часть 1. Результаты экспериментальных исследований // *Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия*. 2018. №1. С. 30–42. DOI: 10.17073/0021-3438-2018-1-30-42.
15. Носов В.К., Кононов С.А., Перевозов А.С. и др. Реологические свойства сплава ЭП742-ИД в контексте интегрированного вычислительного материаловедения и инжиниринга (ICME). Часть 2. Моделирование процесса сжатия образцов и виртуальных заготовок // *Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия*. 2018. №1. С. 43–52. DOI: 10.17073/0021-3438-2018-1-43-52.

16. Пономаренко Д.А., Розененкова В.А., Скугорев А.В., Шишков С.Ю. Эффективное использование защитных технологических покрытий при изотермической штамповке на воздухе сложнопрофильных деталей из титановых сплавов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2014. №9. С. 44–48.
17. Ложкова Д.С., Далин М.А., Ляйзенберг Д.В. Автоматизированный иммерсионный ультразвуковой контроль компонента дивертора термоядерного реактора // Автоматизация в промышленности. 2014. №11. С. 36–38.
18. Ложкова Д.С., Далин М.А., Цыкунов Н.В. Оценка достоверности автоматизированного ультразвукового контроля титановых сплавов // Контроль. Диагностика. 2014. №6. С. 24–28.
19. Ложкова Д.С., Краснов И.С. Экспериментальные исследования по оценке дефектности сварных соединений основных деталей ГТД // Дефектоскопия. 2015. №2. С. 10–16.
20. Каблов Е.Н. К 80-летию ВИАМ // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. Т. 78. №5. С. 79–82.
21. Каблов Е.Н., Сидоров В.В., Каблов Д.Е., Мин П.Г. Металлургические основы обеспечения высокого качества монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 55–71. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-55-71.
22. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М., Летников М.Н., Мазалов И.С. Применение новых деформируемых никелевых сплавов для перспективных газотурбинных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 116–129. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-116-129.