

---

Научная статья

УДК 621.98.043

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-4-13-21

## РАЗРАБОТКА С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ШТАМПОВКИ НА ВОЗДУХЕ ЗАГОТОВОК ДИСКОВ ТУРБОКОМПРЕССОРОВ

Д.В. Капитаненко<sup>1</sup>, Н.В. Моисеев<sup>1</sup>, А.Р. Баженов<sup>1</sup>, Ю.А. Гладков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

<sup>2</sup>ООО «КванторФорм», Москва, Россия; info@qform3d.com

**Аннотация.** Рассмотрены результаты выполненной работы по разработке технологии изготовления штамповок дисков из жаропрочных никелевых сплавов методом изотермической деформации на воздухе с использованием компьютерного моделирования в программном комплексе QForm. Выполнено моделирование напряженно-деформированного состояния штамповой оснастки и разработана технология получения штамповок дисков для использования при изготовлении сварных валов компрессора серии ТК32. Представлены данные о внедрении в серийное производство разработанной технологии.

**Ключевые слова:** жаропрочные никелевые сплавы, изотермическая деформация, компьютерное моделирование, штамповая оснастка, диски турбины, турбокомпрессор

**Для цитирования:** Капитаненко Д.В., Моисеев Н.В., Баженов А.Р., Гладков Ю.А. Разработка с применением компьютерного моделирования технологии изотермической штамповки на воздухе заготовок дисков турбокомпрессоров // Труды ВИАМ. 2022. № 4 (110). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-4-13-21.

Scientific article

## DEVELOPMENT OF THE ISOTHERMAL DEFORMATION ON AIR TECHNOLOGY OF PRODUCTION TURBOCHARGER DISKS USING COMPUTER MODELING

D.V. Kapitanenko<sup>1</sup>, N.V. Moiseev<sup>1</sup>, A.R. Bazhenov<sup>1</sup>, Yu.A. Gladkov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

<sup>2</sup>LLC «QuantorForm», Moscow, Russia; info@qform3d.com

**Abstract.** Describes the results of the work performed on the development of technology for the manufacturing of forgings of disk made of heat-resistant nickel alloys by isothermal deformation on air using computer modeling in the QForm software package. The stress-strain state of die tooling was calculated and the technology for producing disk forgings for welded shafts of the TK32 compressor was developed. Information on the of introduction of the developed technology into serial production are presented.

**Keywords:** heat-resistant nickel alloys, isothermal deformation, computer modeling, die tooling, turbine disks, turbocharger

**For citation:** Kapitanenko D.V., Moiseev N.V., Bazhenov A.R., Gladkov Yu.A. Development of the isothermal deformation on air technology of production turbocharger disks using computer modeling. *Trudy VIAM*, 2022, no. 4 (110), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-4-13-21.

### Введение

Современное дизелестроение требует создания новых турбокомпрессоров с повышенными характеристиками на эксплуатационных режимах – увеличенной на 15–20 % пропускной способностью с перспективой увеличения максимальной степени повышения давления в компрессоре до 5 и увеличенными в 1,5 раза межремонтными сроками.

В связи с этим разработка турбокомпрессоров, соответствующих предъявляемым техническим требованиям, становится невозможным без использования современных методов изготовления деталей, применения в конструкции высокожаропрочных никелевых сплавов, работоспособных в условиях градиента температур и неравномерного напряженного состояния. Одним из способов достижения такого результата является применение более надежного метода соединения жаропрочного диска с полувалом из стали. Используемые в настоящее время штифтовые соединения не обеспечивают необходимую прочность и технологичность. Создание новой технологии соединения жаропрочных дисков с полувалами из стали необходимо для повышения надежности и ресурса турбокомпрессора.

Получение качественного сварного соединения конструкционной стали с жаропрочными никелевыми сплавами является трудной научно-технической задачей, поскольку эти материалы существенно различаются по теплофизическим свойствам, фазовому и химическому составу [1–5].

Применение жаропрочных сплавов на никелевой основе, обладающих уникальным комплексом прочностных свойств за счет высокого содержания легирующих элементов, структуры и фазового состава, позволяет использовать их при высоких температурах (до 800 °С) и динамических нагрузках. Основные проблемы при изготовлении заготовок из жаропрочных сплавов на никелевой основе – это высокое сопротивление пластической деформации и образование горячих трещин в процессе штамповки. Из-за невысокой технологической пластичности этих сплавов при производстве изделий требуется применение специальных методов термомеханической обработки для получения заданной формы и равномерной проработки всего объема металла [6, 7].

В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ (далее – ВИАМ) разработана эффективная технология изотермической деформации высоколегированных жаропрочных никелевых и железоникелевых сплавов, позволяющая изготавливать заготовки сложной геометрической формы с минимальными припусками под окончательную обточку. Применение изотермической штамповки (по сравнению с традиционными технологиями горячей деформации) обеспечивает повышение КИМ в 1–2 раза за счет снижения массы исходной заготовки и трудоемкости окончательной механической обработки детали в 1–3 раза. Основной особенностью этой технологии является возможность проведения деформации при более низких температурах (в гетерофазном состоянии) и усилиях благодаря формированию мелкозернистой структуры во всем объеме заготовок [8].

Основной задачей в процессе разработки технологических параметров изготовления полуфабрикатов из жаропрочных сплавов с использованием метода изотермической штамповки на воздухе является определение условий термомеханической обработки, способных обеспечить формирование необходимой структуры с высокой технологической пластичностью.

Снижение или устранение ликвационной неоднородности высоколегированных сплавов достигается путем проведения предварительной термической обработки заготовок, позволяющей получить однородную микроструктуру с предпочтительным размером и морфологией упрочняющих фаз. Дальнейшая пластическая деформация

в условиях, наиболее приближенных к всестороннему неравномерному сжатию при строго заданных температурно-скоростных параметрах, позволяет обеспечить динамическую рекристаллизацию и сформировать мелкозернистую структуру с высокой пластичностью, а при формировании ультрамелкозернистой структуры – сверхпластичностью [6, 9].

Для обработки давлением дисковых жаропрочных сплавов, чувствительных к скорости деформации, требуется применение технологического оборудования с регулируемой скоростью нагружения, что позволяет контролировать процесс пластического течения металла и обеспечивать динамическую рекристаллизацию за счет оптимальных температурно-скоростных параметров деформации.

Таким образом, процесс деформации жаропрочных никелевых сплавов должен осуществляться при строгом соблюдении оптимальных температурно-скоростных параметров деформации. Эти параметры для деформации сплавов в гетерофазном состоянии устанавливаются с учетом критических температур для конкретного сплава (температур полного растворения основных упрочняющих фаз и начала собирательной рекристаллизации) и критической степени деформации для формирования мелкозернистой структуры.

Изотермическая деформация позволяет наиболее полно реализовать необходимые условия в процессе всего цикла формоизменения заготовки и является наиболее эффективным способом для изготовления высококачественных полуфабрикатов с регламентированной структурой из труднодеформируемых жаропрочных никелевых сплавов.

Для получения штамповок дисков, используемых при изготовлении сварного вала турбокомпрессора, необходимо определить условия термомеханической обработки, обеспечивающие формирование регламентированной структуры, обладающей высокой технологической пластичностью. С этой целью в программном комплексе QForm проведено компьютерное моделирование процесса деформации. Согласно полученным результатам компьютерного моделирования, выбраны оптимальные режимы изотермической деформации, обеспечивающие необходимую степень деформации для протекания процесса рекристаллизации во всем объеме штамповок дисков, и разработана конструкция универсальной штамповой оснастки для штамповки дисков из сплава ЭП718-ИД на специальном гидравлическом прессе с усилием 1600 тс, оборудованном индукционной установкой нагрева штампового инструмента УИДИН-500 (собственной разработки ВИАМ), с возможностью регулировки в широком диапазоне скорости рабочего хода, а также программным управлением процессами нагрева.

Отдельной задачей моделирования технологического процесса изотермической штамповки является моделирование напряженно-деформированного состояния штамповой оснастки. Величина напряжений в штампе в ходе деформирования и срок его службы (число штамповок до выхода штампа из строя) являются важными параметрами, влияющими на стоимость изделий.

Выход из строя штампа возможен по следующим причинам:

- пластическая деформация и разрушение вследствие превышения допустимых для штамповой стали напряжений;
- адгезионный износ гравюры штампов;
- усталостное разрушение вследствие циклической нагрузки при штамповке серии поковок [10].

Цель данной работы – разработка технологии изотермической штамповки на воздухе дисков из сплава ЭП718-ИД с применением компьютерного моделирования технологического процесса деформации в комплексе с моделированием напряженно-деформированного состояния штамповой оснастки.

**Материалы и методы**

Моделирование процесса деформации заготовок дисков из сплава ЭП718-ИД, а также напряженно-деформированного состояния штамповой оснастки проводили в программном комплексе QForm-3D (разработка ООО «КванторФорм»), в котором используется метод конечных элементов.

В качестве исходной заготовки использовали прессованный пруток из сплава ЭП718-ИД, который в соответствии с ГОСТ 5632–2014 содержит следующие основные легирующие элементы, % (по массе):

Fe	Cr	Ni	Ti	Al	W	Mo	Nb
Основа	4–16	43–47	1,9–2,4	0,9–1,4	2,5–3,5	4–5,2	0,8–1,5

Для моделирования процесса деформации заготовок дисков проведена предварительная подготовка: разработан чертеж штамповки диска с минимальными припусками под окончательную механическую обработку, сделан расчет исходной заготовки и выполнено проектирование штамповой оснастки, а также внесены данные в базу программного комплекса на сплав типа ЖС6У для расчета напряженно-деформационного состояния штамповой оснастки. Затем проведены экспериментальные исследования по определению допустимой степени деформации материала при различных температурах и скоростях деформирования.

Оптимальные термомеханические параметры деформации сплава ЭП718-ИД установили по результатам лабораторных испытаний образцов на осадку.

**Результаты и обсуждение**

Осадку образцов проводили на гидравлическом прессе с усилием 63 тс с использованием плоских жаропрочных бойков. В качестве образцов использовали цилиндрические заготовки размером  $\varnothing 15 \times 20$  мм. Образцы нагревали до температуры деформации и выдерживали при этой температуре в течение 60 мин. После выдержки деформацию образцов осуществляли сжатием на плоских бойках при различных температурах с различными скоростями деформирования (с расчетом – три образца на одну точку) с целью определения допустимой деформации, при которой не происходит трещинообразования на боковой поверхности осаженного образца.

Допустимая степень деформации исследуемого сплава составила не более 50 %, оптимальная скорость деформирования – не более 4 мм/с, температурный интервал максимальной пластичности составил 1000–1150 °С.

Проведенный анализ компьютерного моделирования процесса изотермической штамповки в программе QForm заготовок дисков из жаропрочного никелевого сплава ЭП718-ИД позволил определить:

- максимальные усилия деформации, которые составили 1400 тс, что позволяет использовать существующее оборудование – гидравлический пресс с усилием 1600 тс;
- распределение деформации по объему заготовки (на рис. 1 зоны с меньшей деформацией показаны синим цветом). Следует отметить, что области с наименьшей деформацией находятся в зоне сварного шва диска с валом из стали 45, что может негативно сказаться на качестве готового изделия. Для получения мелкозернистой структуры в зоне сварного шва необходимо или иметь исходную заготовку с подготовленной мелкозернистой структурой, или проводить предварительную деформацию исходной заготовки. Для сохранения мелкозернистой структуры в готовом изделии (особенно это важно для зоны, где будет проходить сварка с валом) снижена температура нагрева исходных заготовок под деформацию;
- температурные поля заготовки в процессе деформации. Как видно на рис. 1, наибольшее захлаживание происходит в зоне контакта инструмента и заготовки. Поэтому целесообразно сократить продолжительность штамповки, максимально увеличив

скорость деформирования, и использовать нагрев штамповой оснастки до температур 950–1000 °С;

– заполнение металлом гравюры штампа. На рис. 1 показано, что в процессе деформации происходит полное заполнение гравюры штампа [11–14].

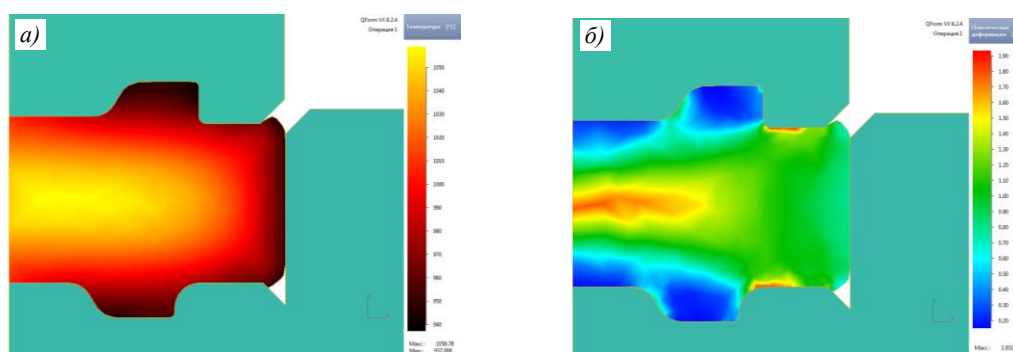


Рис. 1. Компьютерное моделирование технологии деформации жаропрочного сплава ЭП718-ИД: а – температурное поле; б – интенсивность накопленной деформации

При разработке технологии изготовления заготовок дисков путем изотермической штамповки наиболее актуальным является расчет напряженно-деформированного состояния для оценки возможности возникновения пластических деформаций в зонах растяжения.

Для описания нагружения штампа в программном комплексе QForm использована модель линейного упрочнения инструмента [15, 16], состоящая из двух участков (рис. 2). Модель описывает зависимость интенсивности напряжений  $\bar{\sigma}$  от интенсивности суммарной деформации  $\bar{\epsilon}$ , определяемой как сумма упругой и пластической деформаций.

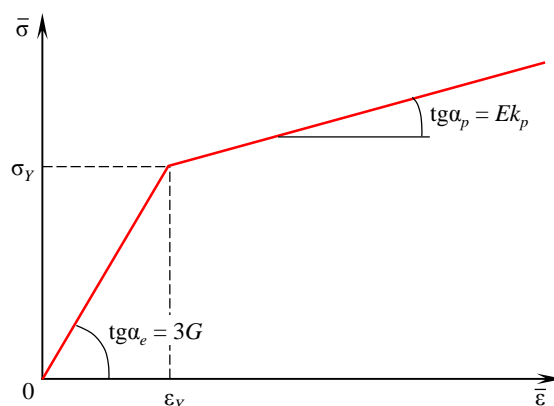


Рис. 2. Модель упрочнения материала штампа

При упругих деформациях, когда  $\bar{\sigma} < \sigma_Y$ , интенсивность напряжений рассчитывается как  $\bar{\sigma} = 3G\bar{\epsilon}$  (где  $G = E/(2(1 + \mu))$  – модуль сдвига;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $E$  – модуль упругости), после появления пластических деформаций – как  $\bar{\sigma} = \sigma_Y + k_p E(\bar{\epsilon} - \epsilon_Y)$ , где  $\sigma_Y$  – предел текучести;  $k_p$  – параметр упрочнения;  $\epsilon_Y$  – упругая деформация, соответствующая пределу текучести.

Анализ напряженно-деформированного состояния показал, что в опасном сечении (концентратор напряжений на радиусах перехода), где по отрицательному значению средних напряжений прогнозируется растяжение (рис. 3, а), поле интенсивности напряжений (рис. 3, б) имеет максимальное значение  $\bar{\sigma} = 509$  МПа, что меньше предела текучести 580 МПа. Это подтверждает работоспособность конструкции штампа.

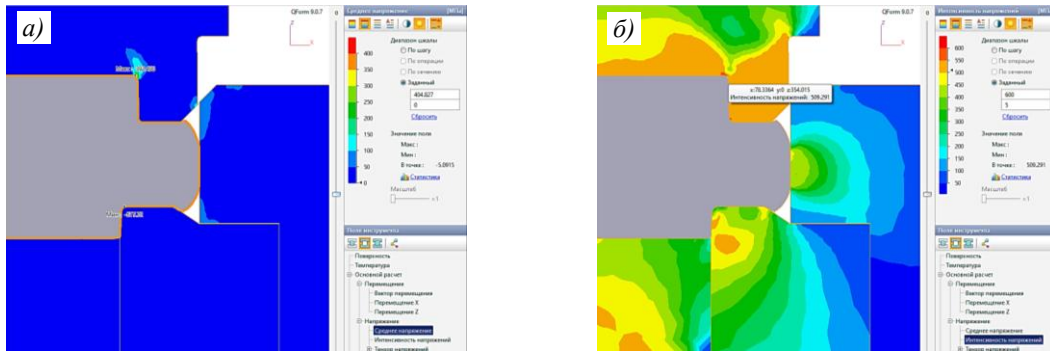


Рис. 3. Расчет напряженно-деформированного состояния в инструменте: *a* – поле средних напряжений; *б* – поле интенсивности напряжений

На основании результатов проведенных исследований и моделирования процессов деформации в ВИАМ разработана технология изготовления штамповок дисков из жаропрочного никелевого сплава ЭП718-ИД методом изотермической деформации на гидравлическом прессе с усилием 1600 тс, оснащенный специальной индукционной установкой УИДИН-500 для нагрева штампового инструмента.

Для снижения усилий деформации и защиты от окисления на исходную заготовку наносили защитно-технологическое покрытие (ЗТП) ЭВТ-24, разработанное в ВИАМ и служащее при нагреве заготовки защитой от окисления, а в процессе деформации оно является высокотехнологичной смазкой с коэффициентом трения скольжения, равным  $\sim 0,05$ . Изготовление штамповки диска из исходной заготовки с нанесенным ЗТП выполняли за одну операцию в условиях изотермической деформации на специализированном гидравлическом прессе с усилием 1600 тс. Полученные штамповки диска подвергали термической обработке для формирования требуемого уровня механических свойств и обеспечения качественного сварного соединения при изготовлении сварных валов турбокомпрессора серии ТК32.

Для оценки качества разработанной технологии изотермической деформации проведены исследования макроструктуры штамповок дисков из сплава ЭП718-ИД после деформации и полной термической обработки (рис. 4). Макроструктура по всему сечению заготовки однородная, без деформационных дефектов, таких как нарушение сплошности (трещин, пустот, расслоений) или резко выраженных линий интенсивного течения металла, что дает возможность применять разработанную технологию в серийном производстве при изготовлении сварного вала турбокомпрессора серии ТК32.

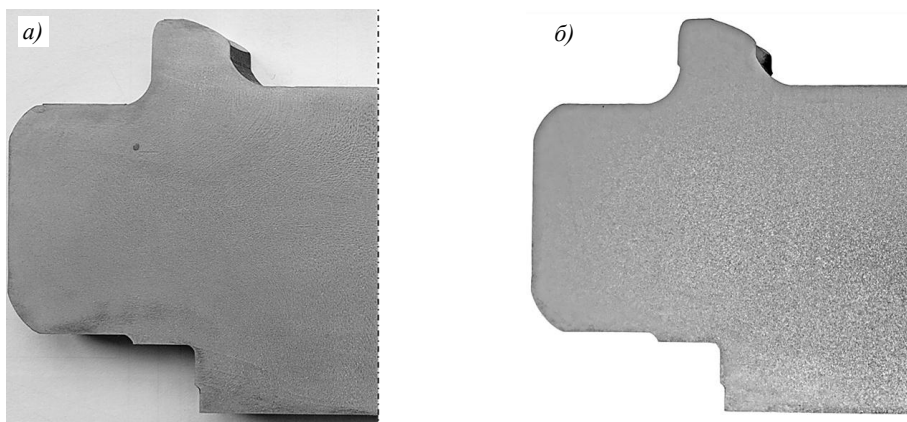


Рис. 4. Макроструктура штамповок из сплава ЭП718-ИД после деформации (*a*) и термической обработки (*б*)

### Заключения

Применение метода компьютерного моделирования в программном комплексе QForm3D при разработке технологического процесса изготовления штамповок дисков из жаропрочных никелевых сплавов методом изотермической деформации на воздухе позволило:

- оценить работоспособность штамповой оснастки;
- подобрать оптимальный режим деформации для получения необходимой структуры в штамповке диска с учетом последующей сварки.

Проведенное моделирование обеспечило сокращение материальных затрат и сроков по разработке и внедрению в производство технологии изготовления штамповок дисков из жаропрочных никелевых сплавов в условиях ВИАМ.

Работоспособность сварного соединения полувазов из стали 45 с дисками из жаропрочного никелевого сплава ЭП718-ИД и целесообразность внедрения разработанных технологий в серийное производство подтверждены стендовыми и типовыми испытаниями сварного ротора в составе турбокомпрессора серии ТК32 на АО «Пензализельмаш».

В настоящее время в эксплуатации находится более 175 локомотивов с дизель-генераторами, оборудованными системой турбонаддува со сварными роторами производства ВИАМ, наработка которых превышает 150 тыс. км.

### Список источников

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. История авиационного материаловедения. ВИАМ – 75 лет поиска, творчества, открытий. М.: Наука, 2007. 343 с.
3. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Свиридов А.В., Грибков М.С. Особенности электронно-лучевой сварки жаропрочных сплавов ЭИ698-ВД и ЭП718-ИД со сталью 45 // *Труды ВИАМ*. 2020. № 9 (91). Ст. 01. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 09.07.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-9-3-14.
4. Ломберг Б.С., Шестаков А.А., Бакрадзе М.М., Карачевцев Ф.Н. Исследование стабильности  $\gamma'$ -фазы размером менее 100 нм в жаропрочном никелевом сплаве ВЖ175-ИД // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 4 (53). С. 3–10. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-4-3-10.
5. Бондаренко Ю.А. Тенденции развития высокотемпературных металлических материалов и технологий при создании современных авиационных газотурбинных двигателей // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 2 (55). С. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-3-11.
6. 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.
7. Волков А.М., Востриков А.В., Бакрадзе М.М. Принципы создания и особенности легирования гранулируемых жаропрочных никелевых сплавов для дисков ГТД // *Труды ВИАМ*. 2016. № 8 (44). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.07.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-2-2.
8. Пономаренко Д.А., Моисеев Н.В., Скугорев А.В. Эффективная технология изготовления дисков ГТД из жаропрочных никелевых сплавов // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. 2013. № 10. С. 13–17.
9. Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А.М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1983. 488 с.

10. Гладков Ю.А., Мордвинцев П.С. Моделирование технологических процессов штамповки при решении задач авиа- и двигателестроения // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2012. № 5. С. 38–47.
11. Шпагин А.С., Кучеряев В.В., Бубнов М.В. Компьютерное моделирование процессов термомеханической обработки жаропрочных никелевых сплавов ВЖ175 и ЭП742 // Труды ВИАМ. 2019. № 8 (80). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.07.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-8-27-35.
12. Бакрадзе М.М., Скугорев А.В., Кучеряев В.В., Бубнов М.В. Компьютерное моделирование технологических процессов обработки металлов давлением как инструмент разработки новых технологий // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 175–185. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-175-185.
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. Стебунов С.А., Биба Н.В. QForm – программа, созданная для технологов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2004. № 9. С. 38–43.
15. Власов А.В., Стебунов С.А., Евсюков С.А. Конечно-элементное моделирование технологических процессовковки и объемной штамповки. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. 383 с.
16. Alimov A., Zabelyan D., Burlakov I., Korotkov I., Gladkov Y. Simulation of Deformation Behavior and Microstructure Evolution during Hot Forging of TC11 Titanium Alloy // Defect and Diffusion Forum. 2018. Vol. 385. P. 449–454. DOI: 10.4028/www.scientific.net/DDF.385.449.

#### References

1. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. *History of aviation materials science. VIAM – 75 years of search, creativity, discoveries*. Moscow: Nauka, 2007, 343 p.
3. Kablov E.N., Antipov V.V., Sviridov A.V., Gribkov M.S. Features of electron beam welding of heat-resistant alloys EI698-VD and EP718-ID with steel 45. *Trudy VIAM*, 2020, no. 9 (91), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 9, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-9-3-14.
4. Lomberg B.S., Shestakova A.A., Bakradze M.M., Karachevtsev F.N. The investigation of the stability of  $\gamma'$ -phase with size below 100 nm in Ni-base superalloy VZh175-ID. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 4 (53), pp. 3–10. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-4-3-10.
5. Bondarenko Yu.A. Trends in the development of high-temperature metal materials and technologies in the production of modern aircraft gas turbine engines. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 2 (55), pp. 3–11. DOI: 10.18577 / 2071-9140-2019-0-2-3-11.
6. Lomberg B.S., Ovsepjan S.V., Bakradze M.M., Letnikov M.N., Mazalov I.S. The application of new wrought nickel alloys for advanced gas turbine engines. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 116–129. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-116-129.
7. Volkov A.M., Vostrikov A.V., Bakradze M.M. Development principles and alloying features of p/m Ni-base superalloys for jet-engine disks application. *Trudy VIAM*, 2016, no. 8, paper no. 2. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 1, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-2-2.
8. Ponomarenko D.A., Moiseev N.V., Skugorev A.V. Efficient technology for manufacturing GTE disks from heat-resistant nickel alloys. *Kuznechno-shtampovochnoye proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniyem*, 2013, no. 10, pp. 13–17.
9. Polukhin P.I., Gun G.Ya., Galkin A.M. *Resistance to plastic deformation of metals and alloys*. Moscow: Metallurgiya, 1983, 488 p.

10. Gladkov Yu.A., Mordvintsev P.S. Modeling of technological processes of stamping in solving problems of aircraft and engine building. *Kuznechno-shtampovochnoye proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniyem*, 2012, no. 5, pp. 8–47.
11. Shpagin A.S., Kucheryaev V.V., Bubnov M.V. Computer simulation of thermomechanical processing of heat-resistant nickel alloys VZh175 and EP742. *Trudy VIAM*, 2019, No. 8 (80), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 01, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-8-27-35.
12. Bakradze M.M., Skugorev A.V., Kucheryayev V.V., Bubnov M.V. Computer modeling of technological metal forming processes as effective instrument for development of new technologies. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 175–185. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-175-185.
13. Stebunov S.A., Bocharov Yu.A. Certification of aviation forgings based on process modeling in the QForm program. *Kuznechno-shtampovochnoye proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniyem*, 2011, no. 6, pp. 33–35.
14. Stebunov S.A., Biba N.V. QForm – a program designed for technologists. *Kuznechno-shtampovochnoye proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniyem*, 2004, no. 9, pp. 38–43.
15. Vlasov A.V., Stebunov S.A., Evsyukov S.A. *Finite element modeling of technological processes of forging and forging*. Moscow: Bauman MSTU, 2019, 383 p.
16. Alimov A., Zabelyan D., Burlakov I., Korotkov I., Gladkov Y. Simulation of Deformation Behavior and Microstructure Evolution during Hot Forging of TC11 Titanium Alloy. *Defect and Diffusion Forum*, 2018, vol. 385, pp. 449–454. DOI: 10.4028/www.scientific.net/DDF.385.449.

#### *Информация об авторах*

**Капитаненко Денис Владимирович**, начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Моисеев Николай Валентинович**, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Баженов Александр Романович**, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Гладков Юрий Анатольевич**, руководитель отдела, к.т.н., ООО «КванторФорм», [info@qform3d.com](mailto:info@qform3d.com)

#### *Information about the authors*

**Denis V. Kapitanenko**, Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Nikolay V. Moiseev**, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Alexander R. Bazhenov**, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Yuriy A. Gladkov**, Head of Department, Candidate of Sciences (Tech.), LLC «QuantorForm», [info@qform3d.com](mailto:info@qform3d.com)

Статья поступила в редакцию 20.07.2021; получена после доработки 09.11.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 31.01.2022.

The article was submitted 20.07.2021; received in revised form 09.11.2022; approved and accepted for publication after reviewing 31.01.2022.