

Научная статья

УДК 669.018.44:669.245

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-8-14-30

## ТЕНДЕНЦИИ ПРОИЗВОДСТВА ЗАГОТОВОК ДИСКОВ ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ С ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

А.В. Востриков<sup>1</sup>, М.С. Яшин<sup>1</sup>, Д.В. Капитаненко<sup>1</sup>

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

**Аннотация.** Приведены технологические способы изготовления дисков с функционально-градиентными характеристиками из жаропрочных никелевых сплавов для деталей авиационных газотурбинных двигателей. В результате установлено, что такие материалы можно получать методами сварки давлением при горячей обработке исходных заготовок, технологией металлургии гранул и способом регламентированной рекристаллизации зерен в результате термической обработки заготовки, сформированной после процесса горячего изостатического прессования. Одним из альтернативных способов получения требуемых характеристик является изготовление металлических композиционных материалов.

**Ключевые слова:** жаропрочные никелевые сплавы, функционально-градиентные характеристики, металлические композиционные материалы, регламентированная рекристаллизация, металлургия гранул, сварка давлением, горячее изостатическое прессование

**Для цитирования:** Востриков А.В., Яшин М.С., Капитаненко Д.В. Тенденции производства заготовок дисков из жаропрочных никелевых сплавов с функционально-градиентными характеристиками // Труды ВИАМ. 2025. № 8 (150). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-8-14-30.

Scientific article

## TRENDS IN THE PRODUCTION OF DISC BLANKS FROM HEAT-RESISTANT NICKEL ALLOYS WITH FUNCTIONALLY GRADED CHARACTERISTICS

A.V. Vostrikov<sup>1</sup>, M.S. Yashin<sup>1</sup>, D.V. Kapitanenko<sup>1</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

**Abstract.** The paper presents technological methods for manufacturing disks with functionally gradient characteristics from heat-resistant nickel alloys for parts of aircraft gas turbine engines. As a result of the analysis of the works, it has been determined that such materials can be obtained by pressure welding during hot processing, the technology of granule metallurgy and regulated recrystallization of grains as a result of heat treatment. One of the alternative methods for obtaining such materials is the manufacture of metal composite materials.

**Keywords:** heat-resistant nickel alloys, functional-gradient characteristics, metal composite materials, controlled recrystallization, granule metallurgy, pressure welding, hot isostatic pressing

**For citation:** Vostrikov A.V., Yashin M.S., Kapitanenko D.V. Trends in the production of disc blanks from heat-resistant nickel alloys with functionally graded characteristics. *Trudy VIAM*, 2025, no. 8 (150), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-8-14-30.

### Введение

В настоящее время основными материалами, из которых изготавливают детали для авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) являются жаропрочные никелевые сплавы (ЖНС) [1–6]. Одними из критических компонентов в составе ГТД являются диски турбин и последних ступеней компрессора, которые в основном изготавливают по технологии металлургии гранул, предусматривающей процессы деформационного и термического воздействия на материал, в результате которых достигают необходимых характеристик, обеспечивающих надежную работу этих деталей в составе ГТД.

Известно, что при работе ГТД в разных зонах диска турбины высокого давления (ТВД) имеет место градиент температур и напряжений. На рис. 1 показаны температурное поле диска ТВД на взлете и типовое поле напряжений в зависимости от условий работы двигателя. Видно, что максимальная температура в ступичной зоне заготовки не превышает 500 °С, в то время как действующие на диск напряжения снижаются по мере перехода от ступичной части заготовки к ободной и, наоборот, на ободе заготовки диска поддерживается максимальная температура, достигающая 650 °С и более [7–9].

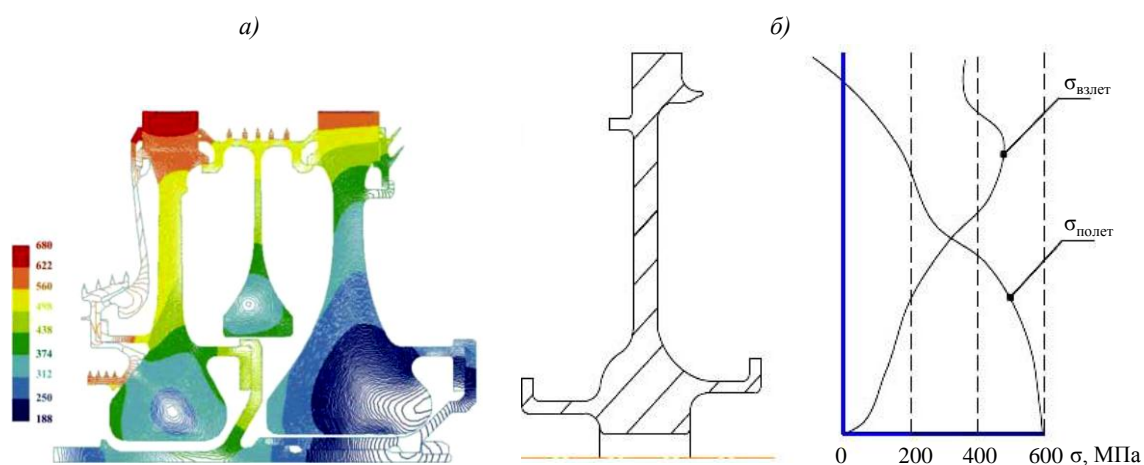


Рис. 1. Условия работы диска ГТД: *a* – температурное поле диска ТВД на взлете; *б* – типовое поле напряжений в диске

Таким образом, от величины температуры газа на входе в турбину, определяющей такие характеристики ГТД, как мощность, ресурс и экологичность, будет зависеть поле температур и напряжений, действующих на роторные детали двигателя, включая все элементы ТВД.

Цель данной работы – анализ современных технологических решений при производстве деталей ГТД из ЖНС с функционально-градиентными характеристиками [10]. Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

### Обзор технологий изготовления дисков ГТД из жаропрочных никелевых сплавов с функционально-градиентными характеристиками

Существуют технологические подходы, позволяющие достичь необходимой структуры в полуфабрикатах, обеспечивающих функционально-градиентные характеристики, которая отвечала бы требованиям конструкторов авиационных ГТД. По своим механическим характеристикам такая структура должна соответствовать следующим требованиям: в ступичной части заготовки необходимо достичь высоких показателей

пределов прочности и текучести, а также повышенного сопротивления росту трещин, возникающих из-за усталости материала. Такая структура обеспечивается в сплаве максимально мелким зерном, а также при выделении упрочняющей  $\gamma'$ -фазы определенного размера. В свою очередь, в ободной области полуфабриката диска ТВД необходимо обеспечить повышенные показатели ползучести и развитие скорости роста трещин от усталости, что обеспечивается путем укрупнения зерна в ободной части и выделения упрочняющей  $\gamma'$ -фазы определенного размера по границам зерен и в их объеме.

На рис. 2 представлена структура полуфабриката диска из ЖНС, обладающего функционально-градиентными характеристиками. Видно, что в ступичной части заготовки достигнута структура с небольшим зерном и относительно мелкими выделениями упрочняющей  $\gamma'$ -фазы, обеспечивающими высокие показатели предела прочности сплава на уровне  $\geq 1600$  МПа, а в ободной части, наоборот, структура сплава отвечает высоким показателям сопротивления высокотемпературной ползучести за счет относительно крупного зерна размером  $\sim(40-50)$  мкм и выделению по границам зерен упрочняющей  $\gamma'$ -фазы необходимого размера.

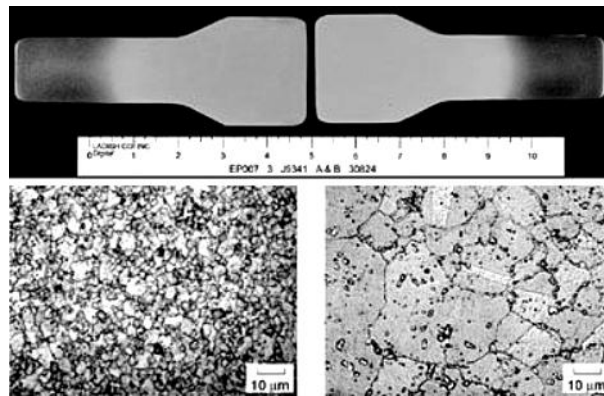


Рис. 2. Структура жаропрочного никелевого сплава, отвечающая реальным условиям эксплуатации дисков ТВД ( $\sigma_b \approx 1600$  МПа;  $\sigma_{100}^{750^\circ} \approx 700$  МПа)

Как упоминалось ранее, в настоящее время существуют технологические подходы, позволяющие достигать необходимого структурного состояния в разных зонах исследуемой заготовки и получать структуру с функционально-градиентными характеристиками, обеспечивающую в зоне ступицы высокие значения пределов прочности и текучести, а также сопротивления малоциклового усталости (МЦУ), а в ободной части – высокие значения длительной прочности и сопротивления МЦУ.

### *Технология сварки давлением*

Одним из таких подходов является метод, предусматривающий деформационное воздействие на материал посредством сварки давлением при горячей обработке в условиях сверхпластичности или сварки давлением со сдвиговой деформацией.

В работах [11–18] показана принципиальная возможность создания твердофазного соединения на основе литого сплава для лопаток типа ВКНА на основе  $Ni_3Al$  с монокристаллической структурой и дискового деформируемого жаропрочного никелевого сплава типа ЭП975, а также соединения типа «диск + вал» из материалов типа ЭК79 и ЭП975, имитирующих детали ГТД.

Для создания элементов типа «блиск» выбран жаропрочный сплав с монокристаллической структурой на основе интерметаллида  $Ni_3Al$ , а в качестве дискового – сплав ЭП975, разработанный в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Способ изготовления детали типа «блиск» посредством сварки давлением заключается в образовании физического контакта между сплавами ЭП975 и ВКНА за счет деформации заготовки из сплава ЭП975 с ультрамелкозернистой структурой в зоне между сплавом ЭП975 с крупнозернистой структурой и сплавом ВКНА вследствие сверхпластической деформации, вызванной в результате приложения соответствующих скоростей деформации и температуры в сплаве ЭП975 с ультрамелкозернистой структурой. В результате обеспечивается схватывание контактных поверхностей заготовок в процессе соединения давлением.

Процесс сварки давлением включает три основные стадии:

- сначала происходит сближение контактных поверхностей сплавов ЭП975 и ВКНА на расстояние, при котором становится возможным взаимодействие между атомами металлов исследуемых заготовок за счет пластического течения в атомных слоях, вызванного деформацией;
- затем образуются химические связи с атомами металла на контактной поверхности другой заготовки;
- заключительная стадия – объемное взаимодействие, представляющее собой процесс, в результате которого между атомами металла соединяемых заготовок образуются прочные химические связи и происходит схватывание заготовок в виде сварки давлением.

На рис. 3 представлена схема сварки давлением и зона твердофазного соединения между сплавами ВКНА и ЭП975.

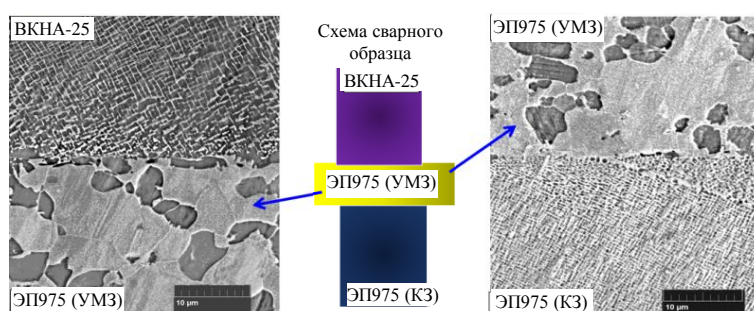


Рис. 3. Схема сварки давлением и зона твердофазного соединения сплава ВКНА-25 с крупнозернистым (КЗ) сплавом ЭП975 через прослойку из ультрамелкозернистого (УМЗ) сплава ЭП975 [13]

В работе [11] проведен физический эксперимент, при котором сварку давлением осуществляли со смещением образцов из материалов ЭП975 и ЭК79, симулирующих работу диска и вала (рис. 4). Скорость деформации составляла  $10^{-5} \text{ с}^{-1}$ , а температура сварки  $\sim 1100 \text{ }^\circ\text{C}$ .

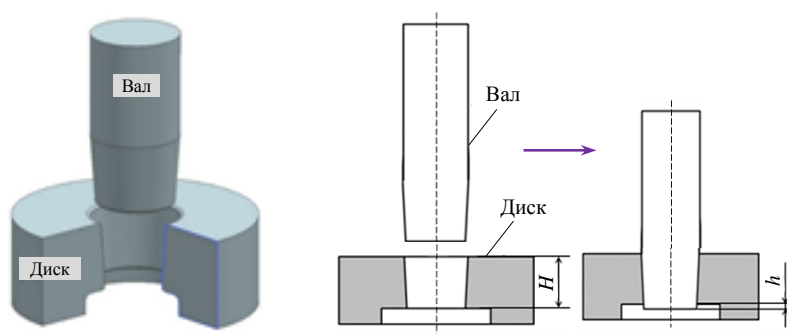


Рис. 4. Общий вид образцов, имитирующих детали ГТД «диск + вал», и схема сварки давлением сплавов ЭК79 и ЭП975

При металлографическом исследовании области твердофазного соединения диска с валом выявлено, что пористость вдоль конического участка вала распределяется неравномерно. Вблизи области верхнего и нижнего оснований полуфабриката (рис. 5, а, позиции 1 и 3) относительная протяженность пор составляла <15 %, в то время как в центральной зоне (позиция 2) это значение составляет ~2 %.

При микрорентгеноспектральном анализе установлено, что в зоне твердофазного соединения наблюдалось монотонное изменение состава легирующих элементов (рис. 6).

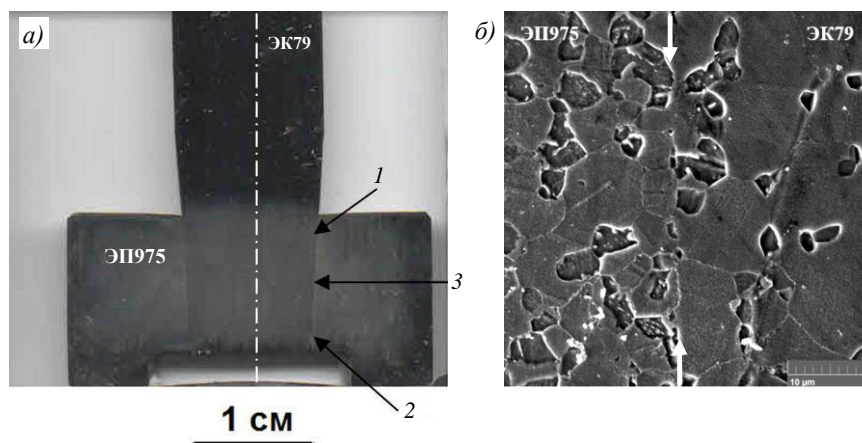


Рис. 5. Образцы после сварки давлением: а – общий вид; б – структура в зоне твердофазного соединения [11]

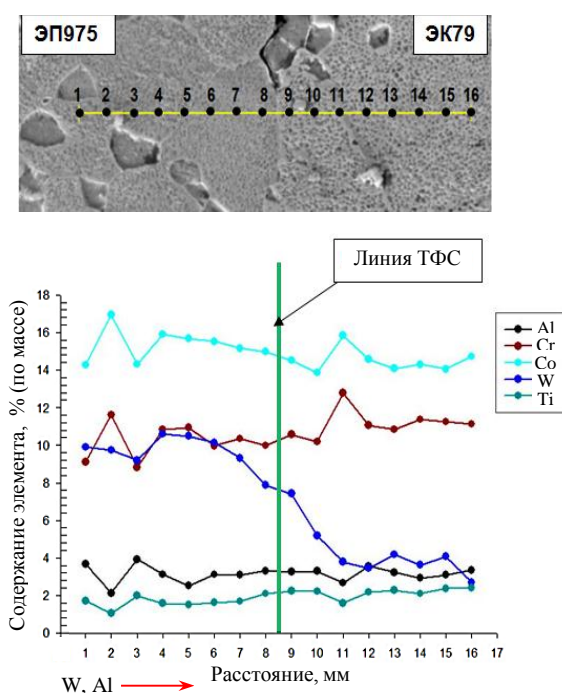


Рис. 6. Результаты микрорентгеноспектрального анализа зоны трехфазного соединения (ТФС) сплавов ЭП975 + ЭК61 [11]

Как указано в работе [16], формированию твердофазного соединения между сплавами ЭК79 и ЭП975 благоприятствовали деформация, вызванная сдвиговой составляющей, так как в ходе деформации со сдвигом оксидная пленка может подвергнуться разрушению в областях контактных поверхностей, в которых материалы соединяются,

и образование новых поверхностей, что является одним из главных условий для формирования неразъемного беспористого твердофазного соединения.

### *Технология металлургии гранул*

Другой технологией, с помощью которой получают элементы ГТД с функционально-градиентными характеристиками, является гранульная металлургия. В настоящее время существует две технологические схемы получения элементов ГТД с требуемыми характеристиками по технологии металлургии гранул: «гранулы + гранулы» и «компакт + гранулы».

Известен способ получения таких полуфабрикатов по схеме «гранулы + гранулы», при котором во вращающуюся капсулу последовательно засыпают гранулы разного химического состава [19], достигая первичного уплотнения засыпаемых в капсулу гранул ЖНС за счет центробежной силы. После подготовки капсулы, включающей герметизацию, проводят процесс горячего изостатического прессования (ГИП) и таким образом формируют две выраженные зоны зерен разного размера или двух различных материалов, отвечающих требуемым свойствам в разных частях капсулы.

В патенте [20] фирмы General Electric при получении полуфабриката ГТД гранулы двух различных сплавов засыпали в разные зоны заготовки, разделенной цилиндрической вставкой, которую удаляли после засыпания гранул (рис. 7). Данный способ предусматривал получение фиксированной границы раздела между зонами из двух разных сплавов без их глубокого взаимного проникновения. При этом ободную зону капсулы заполняли гранулами более жаропрочного сплава для получения требуемых свойств сопротивления материала высокотемпературной ползучести и МЦУ, а ступичную зону – гранулами сплава, обладающего более высокими значениями прочности, для получения высоких показателей предела прочности и сопротивления МЦУ.

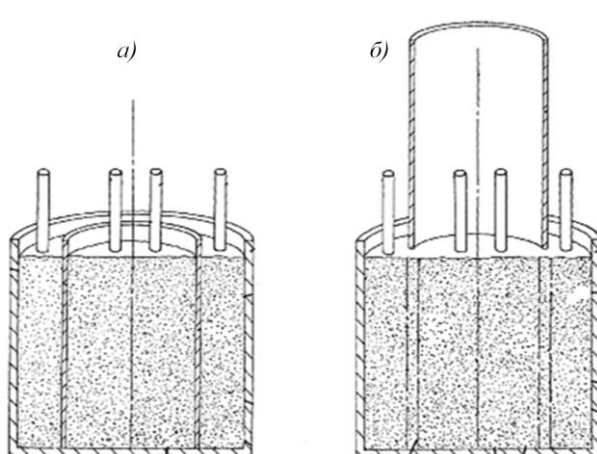


Рис. 7. Схема засыпки гранул в капсулу с цилиндрической вставкой: а – капсула с гранулами; б – капсула с гранулами после извлечения цилиндрической вставки

Похожим способом в патенте [21] получали полуфабрикаты с функционально-градиентными характеристиками. Данный способ включал:

- засыпку в разделенную цилиндрической вставкой капсулу диска, состоящую из ободной и ступичной частей, гранул двух разных ЖНС с разными показателями прочности и жаропрочности или гранул различных фракций одного ЖНС;

- удаление цилиндрической вставки, ГИП и последующую термическую обработку (рис. 8).

В данном способе толщина стенки цилиндрической обечайки небольшого размера, а толстостенное дно придает жесткость конструкции. Фиксирующее кольцо

выполняет функцию замка, не допускающего смешивания гранул и смещения обечайки. После удаления цилиндрической обечайки капсулу с гранулами подвергали операциям дегазации, герметизации с последующими ГИП и термической обработкой. Способ обеспечивает четкую фиксированную границу раздела между гранулами с отсутствием эллипсности и нарушений концентричности, что приводит к уменьшению ширины области перемешивания гранул, а также исключает неуравновешенность массы комбинированной заготовки. С применением данного способа были получены полуфабрикаты с функционально-градиентными характеристиками из гранул как двух разных сплавов [22], так и одного сплава, но разного фракционного состава [23, 24].

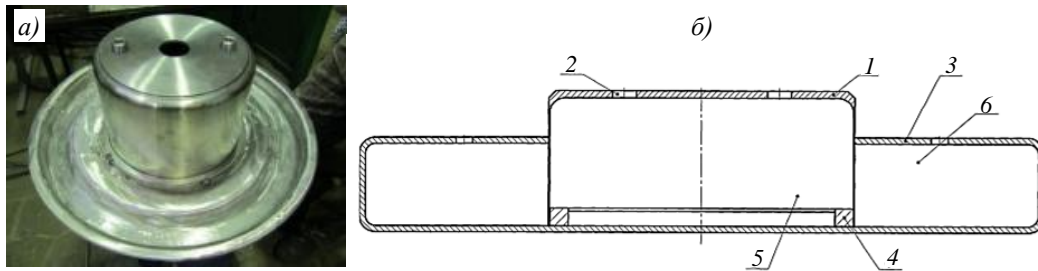


Рис. 8. Внешний вид детали «Разделитель» (а) и схема разделительной вставки (б) для получения изделий из гранул: 1 – разделительная вставка; 2 – цилиндрическая обечайка с отверстиями для засыпки гранул; 3 – капсула; 4 – фиксирующее кольцо; 5, 6 – гранулы [8, 21]

При получении полуфабриката в виде заготовки диска из гранул двух разных жаропрочных никелевых сплавов с функционально-градиентными характеристиками [22], на ободе заготовки, работающем при температуре 750 °С, удалось обеспечить высокие характеристики жаропрочности и низкие показатели скорости распространения усталостной трещины, а в зоне ступицы – высокие показатели предела прочности и сопротивления МЦУ. Этого удалось достичь за счет того, что фракционный состав используемых гранул высокожаропрочного и высокопрочного сплавов существенно отличался, а это давало возможность сформировать в ступичной зоне заготовки при операциях ГИП более мелкое зерно, а в ободной – более крупное.

Температура полного растворения упрочняющей  $\gamma'$ -фазы используемых сплавов отличалась не более чем на 5–10 °С, что давало возможность проводить операции ГИП и обработки на твердый раствор всей заготовки в однофазной  $\gamma$ -области. Данные обстоятельства приводили к тому, что при ГИП сформировалась полностью рекристаллизованная, без границ исходных гранул, структура, а при закалке заготовки обеспечивалось выделение всей упрочняющей  $\gamma'$ -фазы в каждом сплаве в мелкодисперсном виде.

При получении заготовки с функционально-градиентными характеристиками из гранул сплава ЭП741НП двух различных фракций удалось обеспечить высокие прочностные характеристики и сопротивление росту усталостной трещины в ступичной зоне и добиться высоких показателей сопротивления высокотемпературной ползучести на ободе получаемого диска [23, 24]. В свою очередь, достигнуто также отсутствие критической переходной зоны с меняющимся температурным коэффициентом линейного расширения и модулем упругости. При получении данной заготовки ободную зону капсулы заполняли гранулами фракции >200 мкм, а ступичную – менее 50 мкм. Горячее изостатическое прессование и термическую обработку полученного диска проводили в однофазной  $\gamma$ -области (выше температуры сольвус сплава ЭП741НП). Обработка на твердый раствор в однофазной области сплава и последующая закалка из нее позволяли выделить упрочняющую  $\gamma'$ -фазу в мелкодисперсном виде.

Мелкое зерно благодаря использованию гранул малого размера и более мелкие выделения упрочняющей  $\gamma'$ -фазы (за счет удаления оболочки) позволяли получить

в одной части заготовки повышенную прочность и сопротивление МЦУ, а крупное зерно и выделения  $\gamma'$ -фазы в другой части заготовки обеспечивали увеличение жаропрочности.

На рис. 9 представлен полуфабрикат диска из гранул ЖНС, полученный по технологической схеме «гранулы + гранулы».

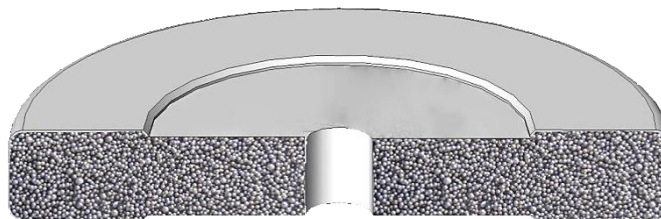


Рис. 9. Заготовка диска из гранул жаропрочного никелевого сплава, полученного по технологической схеме «гранулы + гранулы»

Следует отметить, что при проектировании капсулы для изготовления дисков по технологии «гранулы + гранулы» с непостоянным по радиусу заготовки химическим составом необходимо учитывать особенности, связанные с границей раздела между сплавами. Известно, что напряжения изменяются плавно по сечению заготовки диска, так же как и температура в разных ее зонах. Резкая фиксированная граница сплавов может приводить к скачкообразному изменению свойств, а плавная граница – более предпочтительна, так как в этом случае сохраняется условие функционально-градиентных характеристик и отсутствует скачок свойств (как в случае фиксированной границы), а также неоднородность получаемых структур. Эти условия необходимо учитывать при реализации технологической схемы «гранулы + гранулы». На рис. 10 представлена структура гранулируемого ЖНС в переходной зоне, полученного по технологической схеме «гранулы + гранулы».



Рис. 10. Переходная зона в структуре гранулируемого жаропрочного никелевого сплава с функционально-градиентными характеристиками в разных зонах заготовки диска ГТД

Помимо технологической схемы «гранулы + гранулы», предусматривающей получение полуфабриката с функционально-градиентными характеристиками, существует схема «компакт + гранулы». Так, фирмой Siemens Power Generation Inc. разработан способ [25] изготовления диска с предварительным изготовлением внешнего (внутреннего) кольца будущей заготовки и укладкой его в пресс-форму, после чего оставшийся объем засыпали гранулами второго сплава и проводили процесс ГИП последовательно заполняемых частей капсулы, как в более ранней работе [26] (рис. 11).

В способе, представленном в патенте [27], осуществляли горячую пластическую деформацию заготовки и термическую обработку для выращивания зерна в области обода заготовки, а затем горячую пластическую деформацию в области ступицы для формирования мелкого зерна и обеспечения высокой прочности и сопротивления МЦУ.

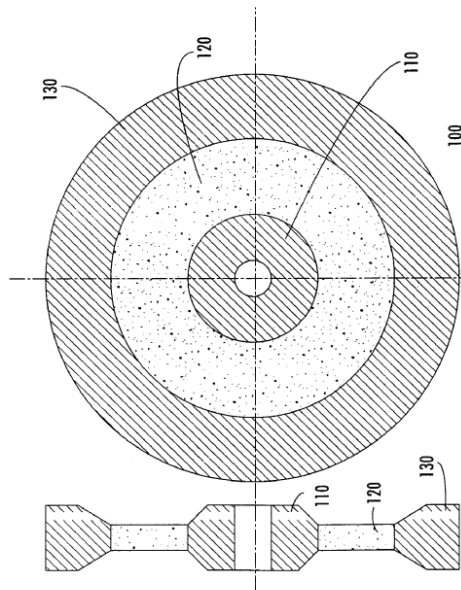


Рис. 11. Схема засыпки биметаллического диска, полученного по технологии «компакт + гранулы» [25]

В работе отечественных авторов [28] тоже приведены исследования, направленные на получение заготовок дисков по технологической схеме «компакт + гранулы». Отмечается, что при ГИП комбинации гранулируемого сплава ЭП741НП и деформируемого сплава ЭИ698ВД, полученного по традиционной технологии, в образовавшейся при соединении переходной зоне отсутствовали частицы карбидов и интерметаллидов, которые могли приводить к преждевременному разрушению детали. Аналогичная ситуация складывалась при образовании переходной зоны между гранулируемым сплавом ЭП962П и деформируемым сплавом ЭП975. В данном случае также наблюдался плавный переход от структуры деформируемого сплава ЭП975 к структуре гранулируемого сплава ЭП962П без каких-либо следов переходной границы между ними. Однако при ГИП комбинации литейных сплавов ЖС6У и ЖСЗДК с гранулируемым сплавом ЭП741НП наблюдалась четкая граница, которая состояла из сплошного каркаса крупных выделений  $\gamma'$ -фазы, что является нежелательным, так как основная задача заключается в обеспечении четкой переходной, без каких-либо выделений границы между сплавами.

Следует подчеркнуть, что при изготовлении биметаллических дисков по технологической схеме «компакт + гранулы», определяющим фактором будет качество переходной зоны в области соединения монолитного и гранулируемого материалов при ГИП. В свою очередь, во время ГИП деталей, получаемых по технологической схеме «компакт + гранулы», последовательно реализуются следующие стадии процесса: образование физического контакта между гранулами и монолитным материалом; ликвидация поверхностных и адсорбированных пленок и деформация поверхностных слоев металлов вследствие повышения температуры и давления; взаимная диффузия компонентов соединяемых сплавов и формирование структуры зоны соединения за счет процессов рекристаллизации.

В работе [29] показано, что в зависимости от прочности гранул и монолитного сплава при проведении ГИП могут наблюдаться различные ситуации, связанные с качеством переходной зоны в месте соединения компакта с гранулами. Если твердость гранул в 1,5 и более раз больше твердости монолитного материала, то сферические гранулы, не деформируясь сами, глубоко проникают в монолитный сплав. При этом глубина проникновения может достигать больше половины диаметра гранулы, что будет приводить к большой локальной пластической деформации в поверхностном слое

сплава. Если твердость соединяемых материалов отличается незначительно, то сферические гранулы, деформируясь сами, одновременно будут проникать в поверхность монолитного материала. В этом случае глубина проникновения будет составлять менее половины диаметра гранулы. При этом гранулы, как правило, деформируются пластично без хрупкого разрушения, а поверхность контакта при такой схеме будет представлять собой волнистую линию, которой определяется степень взаимной деформации соединяемых материалов. Если твердость монолитного материала будет превышать твердость гранулируемого, то сферические гранулы, деформируясь сами, не будут проникать в монолитный материал. Причем степень деформации гранул, ближайших к поверхности контакта, будет так велика, что они зачастую будут полностью разрушаться, а монолитный материал деформироваться не будет.

### *Технология регламентированной рекристаллизации зерен посредством термической обработки*

Еще одним способом достижения функционально-градиентных характеристик в заготовках дисков из ЖНС является способ, предусматривающий регламентированную рекристаллизацию зерен в разных частях сформированной заготовки диска ГТД посредством термической обработки. На рис. 12 представлена модельная структура заготовки диска из ЖНС, полученного в результате регламентированной рекристаллизации зерен в различных зонах заготовки вследствие термической обработки.

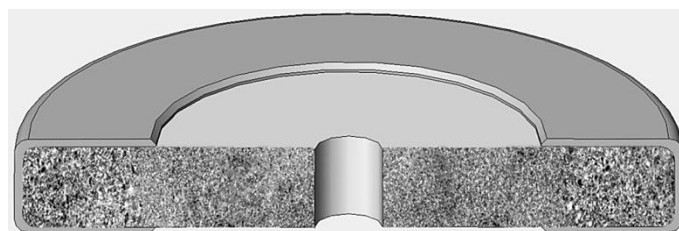


Рис. 12. Заготовка диска ГТД из жаропрочного никелевого сплава, полученного в результате регламентированной рекристаллизации зерен в различных зонах

В ранних зарубежных патентах для получения структуры с градиентом размера зерен в разных частях заготовки диска с помощью метода регламентированной рекристаллизации применяли специальную термическую обработку, которая заключалась в следующем: в патентах [30, 31] на примере сплавов Rene 95, Astroloy и IN100 показано, что для обеспечения высоких показателей сопротивления скорости роста усталостной трещины необходима реализация медленного охлаждения при закалке заготовки с температуры полного растворения упрочняющей  $\gamma'$ -фазы. На примере этих сплавов установлено, что интенсивность охлаждения при закалке должна быть по меньшей мере в 2 раза выше в зоне ступицы по сравнению с ободом заготовки.

В патенте фирмы General Electric [32] на примере сплава Rene 95 осуществляли термическую обработку, которая также заключалась в медленном охлаждении ободной части заготовки по сравнению со ступичной за счет того, что зону ступицы обдували сжатым газом, осуществляя таким образом требуемую термическую обработку с высокой скоростью охлаждения и формируя малый размер зерна, а также выделений  $\gamma'$ -фазы в этой части заготовки необходимого размера. Однако одним из недостатков методов получения градиентной зеренной структуры с применением теплоизолирующих накладок является то, что в ступичной зоне заготовки при обработке на твердый раствор и последующей выдержке практически невозможно получить требуемый высокий уровень прочностных характеристик из-за наличия крупных выделений  $\gamma'$ -фазы, образующихся при нагреве ниже температуры сольвус.

Фирмой United Technologies Corporation отработана технология и запатентована установка для получения заготовок дисков с функционально-градиентными характеристиками при помощи метода регламентированной рекристаллизации [33]. Установка включала фундамент с открытой решеткой в ее центре. На фундаменте расположен теплоизолирующий материал, на который уложен слой жесткой графитовой обшивки.

Сборка включала поднимающий стержень, опору диска, а также опорное кольцо, которое служило для фиксации заготовки и обеспечения его охлаждения. Для передачи энергии индуктору в установке располагали медные токоподводы. Заготовку диска обертывали проводящим материалом, вокруг которого располагали графитовый войлок. На рис. 13 представлена схема установки для получения дисков из ЖНС методом регламентированной рекристаллизации.

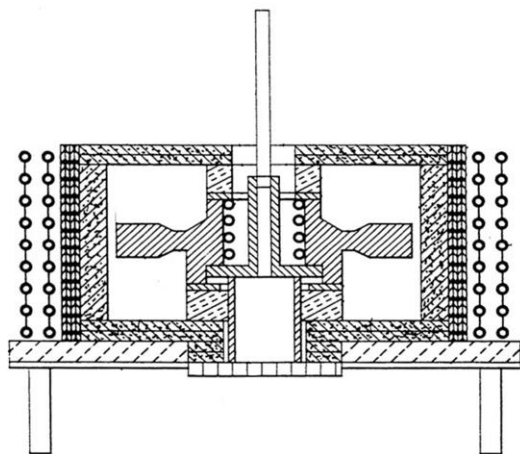


Рис. 13. Схема установки для получения дисков из жаропрочных никелевых сплавов методом регламентированной рекристаллизации

После подачи на индукторы напряжения, заготовку диска нагревали до температуры  $\sim 1180$  °С в районе полотна и до 1200 °С в ободной части заготовки. За время термической обработки происходило полное растворение упрочняющей  $\gamma'$ -фазы для ее дальнейшего выделения в виде дисперсных частиц нужного размера в разных частях термообрабатываемой заготовки.

Закалку заготовки диска осуществляли таким образом, что ободная часть заготовки охлаждалась воздухом. При этом индуктор, расположенный внутри заготовки диска, кроме водяного получал также и воздушное охлаждение. В результате обеспечивался одновременно отвод тепла от ступичной части и достаточный температурный градиент внутри заготовки диска в ходе термообработки.

Одним из перспективных методов получения заготовок дисков с помощью метода регламентированной рекристаллизации является метод, разработанный сотрудниками Glenn Research Center из National Aeronautics and Space Administration, опробованный и реализованный в компании Ladish (Dual Micro Heat Treatment – DMHT) [34]. Этот метод основан на создании термического градиента по сечению заготовки диска посредством применения керамических накладок, которые тормозят нагрев области ступицы выше температуры сольвус  $\gamma'$ -фазы, сохраняя в этой части мелкозернистую микроструктуру [35–37]. Установка для фиксации термообрабатываемого диска состоит из термических блоков меньшего диаметра, чем диск. После установки узла в печь производят нагрев ободной части диска с комнатной температуры до температуры выше полного растворения  $\gamma'$ -фазы термообрабатываемого сплава (рис. 14). При этом нагрев заготовки диска в области ступицы происходит значительно медленнее, чем в области обода, а контроль и необходимое регулирование температуры блока проводят с использованием термопары с индикаторами и теплопроводящими стержнями.

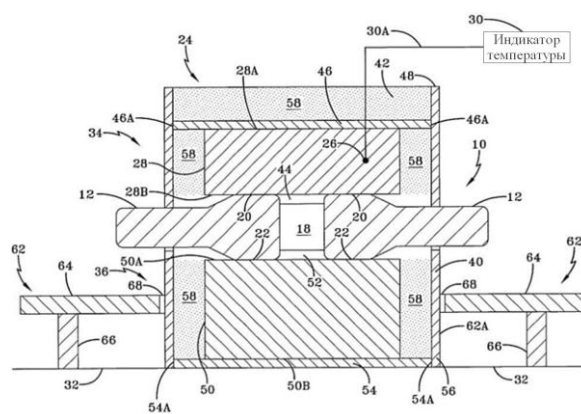


Рис. 14. Технологическая схема получения заготовки диска с градиентной зеренной структурой с помощью метода DMHT (Dual Micro Heat Treatment)

Главными преимуществами метода DMHT являются возможность его реализации в печах действующего серийного производства без вкладывания средств в разработку нового промышленного оборудования, а также высокая воспроизводимость процесса [38]. Так, отмечается, что садка при обработке на твердый раствор перед закалкой заготовки может состоять одновременно из четырех заготовок дисков.

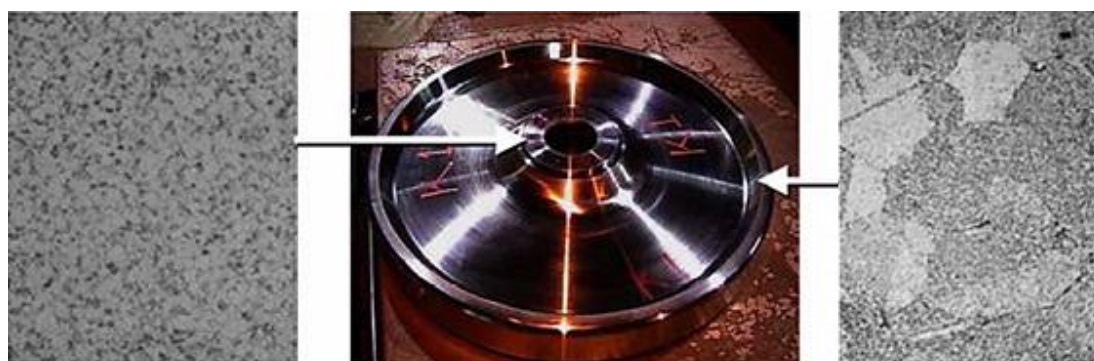


Рис. 15. Заготовка турбинного диска из сплава Alloy 10, полученного методом DMHT (Dual Micro Heat Treatment) [39]

С помощью метода DMHT получены заготовки дисков с функционально-градиентными характеристиками из таких сплавов, как LSHR, RR1000, ME3 (Rene 104) и Alloy 10 [39]. На рис. 15 представлена заготовка турбинного диска из ЖНС марки Alloy 10 с функционально-градиентными характеристиками, полученного путем регламентированной рекристаллизации.

#### ***Технология металлических композиционных материалов***

Одними из альтернативных материалов, обеспечивающих функционально-градиентные характеристики наравне с традиционно используемыми сплавами, являются металлические композиционные материалы (МКМ), армированные упрочняющими некогерентными с матрицей материалами, например волокнами.

Технология получения таких материалов и деталей из них заключается в том, что сначала получают непрерывные волокна карбида кремния SiC. Затем, для предотвращения при повышенных температурах химического взаимодействия между матрицей и волокном, на волокна методом осаждения из паровой фазы наносят защитные покрытия. После получения оптимальной структуры волокна укладывают внутри матричного материала определенным образом и проводят процессы ГИП или горячего жидкофазного спекания.

Так, МКМ на основе титана широко используют для изготовления дисков компрессора. Многие зарубежные фирмы, такие как Rolls-Royce, Snecma, MTU и т. д., осуществили переход от конструкции диска компрессора типа «блиск» к конструкции типа «блинг» (рис. 16). Этот переход позволил снизить массу конструкции на 40 % при увеличении динамических характеристик [40].

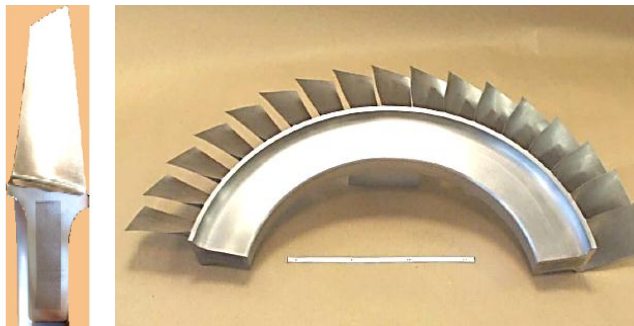


Рис. 16. Металлический композиционный материал на основе титана, армированного непрерывными волокнами SiC, и сегмент диска компрессора конструкции типа «блинг»

Однако следует отметить, что в настоящее время для ЖНС подобные технологии еще не реализованы, а издержки производства таких материалов достаточно большие по сравнению со стандартными материалами, обеспечивающими функционально-градиентные характеристики.

### Заключения

В настоящее время существует несколько наиболее распространенных способов изготовления дисков из ЖНС с функционально-градиентными характеристиками. К ним относятся сварка давлением исходной заготовки, сформированной из гранул при горячей обработке; технология металлургии гранул, которая включает две технологические схемы: «гранулы + гранулы» и «компакт + гранулы», а также способ регламентированной рекристаллизации зерен в разных зонах получаемой заготовки диска в результате термической обработки. Кроме того, существует альтернативный способ изготовления материалов с функционально-градиентными характеристиками – производство МКМ, армированных непрерывными волокнами неметаллических соединений.

### Список источников

1. Каблов Е.Н. *Авиационное материаловедение в XXI веке. Перспективы и задачи* // *Авиационные материалы. Избранные труды ВИАМ 1932–2002 г. М.: МИСиС–ВИАМ, 2002. С. 23–47.*
2. 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.*
3. Ечин А.Б., Бондаренко Ю.А., Колодяжный М.Ю., Сурова В.А. *Обзор перспективных высокотемпературных жаропрочных сплавов на основе тугоплавких металлических материалов для производства газотурбинных двигателей* // *Авиационные материалы и технологии. 2023. № 3 (72). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 10.12.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-30-41.*
4. Мин П.Г., Вадеев В.Е. *Разработка и внедрение в серийное производство нового жаропрочного никелевого сплава ВЖЛ125 для лопаток перспективных авиационных двигателей* // *Авиационные материалы и технологии. 2023. № 1 (70). Ст. 01. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 10.12.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-3-16.*
5. Нарский А.Р., Дейнега Г.И., Кузьмина И.Г. *Получение мелкозернистой структуры отливок из жаропрочных никелевых сплавов при использовании модификатора – алюмината кобальта* // *Авиационные материалы и технологии. 2023. № 3 (72). Ст. 01. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 10.12.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-3-14.*

6. Колядов Е.В., Висик Е.М., Герасимов В.В., Битюцкая О.Н. Особенности морфологии структуры жаропрочного никелевого сплава в зависимости от величин осевого и радиального градиентов температуры на фронте кристаллизации // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. № 2 (75). Ст. 02. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 10.12.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-15-24.
7. Гарибов Г.С., Гриц Н.М. Пути создания новых высокожаропрочных гранулируемых сплавов для перспективных авиадвигателей // *Журнал технология легких сплавов*. 2012. № 3. С. 35–44.
8. Егоров Д.А. Исследование и разработка технологии производства заготовок турбинных дисков с функционально-градиентными характеристиками из гранул жаропрочных никелевых сплавов: дис. ... канд. техн. наук. М., 2016. 221 с.
9. Бочарова А.А., Гриц Н.М., Казберович А.М. Заготовки биметаллических дисков с функционально-градиентными свойствами из перспективных гранулируемых жаропрочных никелевых сплавов // *Журнал технология легких сплавов*. 2013. № 4. С. 135–143.
10. 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.
11. Valitov V.A., Akhunova A.Kh., Galieva E.V. et al. The stress-strain state and the microstructure in disk-shaft solid-phase bonds of dissimilar nickel-based alloys // *Journal Letters on materials*. 2017. Vol. 7 (2). P. 180–185. DOI: 10.22226/2410-3535-2017-2-180-185.
12. Ахунова А.Х., Галиева Э.В., Поварова К.Б., Базылева О.А., Валитов В.А., Дмитриев С.В., Дроздов А.А., Аргинбаева Э.Г. Моделирование сварки давлением разнородных литых и деформируемых сплавов на основе никеля в условиях объемного пластического течения // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2016. Т. 13. № 1. С. 131–135.
13. Valitov V.A., Povarova K.B., Bazyleva O.A., Drozdov A.A., Ovsepyan S.V., Galieva E.V. Research of solid compound formation during thermal deformation effect on intermetallic Ni<sub>3</sub>Al-alloy with a heat-resistant alloy EP975 and influence on the physical, mechanical and performance properties // *Materials Science Forum*. 2016. Vol. 838–839. P. 523–527. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.838-839.523.
14. Поварова К.Б., Валитов В.А., Дроздов А.А., Базылева О.А., Галиева Э.В., Аргинбаева Э.Г. Формирование градиентных структур в зоне соединения деформируемого никелевого и монокристаллического интерметаллидного сплава при термодиффузионной сварке давлением и термической обработке // *Металлы*. 2018. № 1. С. 48–57.
15. Галиева Э.В., Поварова К.Б., Дроздов А.А., Валитов В.А. Строение и свойства твердофазных соединений деформируемого никелевого сплава ЭП975 и монокристаллического интерметаллидного сплава ВКНА-25, полученных сваркой давлением со степенью деформации 24 % в условиях сверхпластичности сплава ЭП975 // *Металлы*. 2018. № 6. С. 64–72.
16. Способ изготовления биметаллического изделия: пат. 2608118; РФ; заявл. 15.07.15; опубл. 13.01.17.
17. Валитов В.А., Мулюков Р.Р., Ломберг Б.С., Оспенникова О.Г., Овсепян С.В., Утяшев Ф.З., Бубнов М.В. Влияние сверхпластической деформации и термической обработки на структуру и свойства дисков ГТД из гетерофазных никелевых сплавов // *Тр. Всерос. конф. «Современные жаропрочные деформируемые никелевые и интерметаллидные сплавы, методы их обработки»*. М.: ВИАМ, 2015. С. 3.
18. Поварова К.Б., Валитов В.А., Овсепян С.В., Дроздов А.А., Базылева О.А., Валитова Э.В. Изучение свойств и выбор сплавов для дисков с лопатками («Блисков») и способа их соединения // *Металлы*. 2014. № 5. С. 61–70.
19. Multi-alloy turbine rotor disk: pat. 4900635 US; appl. 09.02.89; publ. 13.02.90.
20. Method for making a compositionally graded gas turbine disk: pat. 7537725 B2 US; appl. 19.09.05; publ. 26.05.09.
21. Способ получения диска газотурбинного двигателя: пат. 2536124 С1 Рос. Федерация; заявл. 21.08.13; опубл. 20.12.14.
22. Способ получения биметаллического диска газотурбинного двигателя: пат. 2537335 С1 Рос. Федерация; заявл. 24.06.13; опубл. 01.01.15.
23. Способ получения переменной структуры по сечению порошковой заготовки: пат. 2455115 С1 Рос. Федерация; заявл. 17.02.11; опубл. 10.07.12.

24. Гарибов Г.С., Гриц Н.М., Федоренко Е.А. и др. Исследование возможности изготовления заготовок дисков ГТД с переменной структурой и функционально-градиентными свойствами из гранул разных фракций // *Технология легких сплавов*. 2011. № 4. С. 41–49.
25. Powder/wrought alloy composite turbine disc: pat. 7137787 US; appl. 17.06.04; publ. 21.11.06.
26. Method of forming a rotor: pat. 4680160 US; appl. 11.12.85; publ. 14.07.87.
27. Method of producing turbine disks: pat. 4608094 US; appl. 18.12.84; publ. 26.08.86.
28. Правикова Л.А., Рудницкий Е.Н., Еременко В.И., Мозолевская О.А. Особенности фазового состава и микроструктуры переходной зоны между составляющими сплавами в комбинированных заготовках из жаропрочных никелевых сплавов // *Сб. 3-й Всесоюз. конф. по металлургии гранул*. М.: Изд-во ВИЛС, 1991. С. 120–121.
29. Шиварнов Н.С. О роли переходной зоны в биметаллических деталях из гранулированного и монолитного материалов, полученных технологией ГИП // *Технология легких сплавов*. 2017. № 2. С. 34–42.
30. Method of forming fatigue crack resistant nickel base superalloys: pat. 4816084 US; appl. 15.09.86; publ. 28.03.89.
31. Method of making superalloy turbine disks having graded coarse and fine grains: pat. 5312497 US; appl. 31.12.91; publ. 17.05.95.
32. Method of making high strength superalloy components with graded properties: pat. 4820358 US; appl. 01.04.87; publ. 11.04.89.
33. Method of making superalloy turbine disks having graded coarse and fine grains: pat. 5312497 US; appl. 31.12.91; publ. 17.05.94.
34. Heat treatment devices and method of operation thereof to produce dual microstructure superalloy disks: pat. 6660110 US; appl. 08.04.02; publ. 09.12.03.
35. Gayda J., Furrer D. Dual-Microstructure Heat Treatment // *Advanced Materials and Processes*. 2003. Vol. 161. No. 7. P. 36–39.
36. Gayda J., Gabb T., Kantzos P., Furrer D. Low cost heat treatment process for production of dual microstructure superalloy disks. Cleveland, OH: NASA Glenn Research Center, 2003. P. 1–9.
37. Gabb T.P., Kantzos P.T., Telesam J. et al. Fatigue resistance of the grain size transition zone in a dual microstructure superalloy // *International journal of fatigue*. 2011. Vol. 33. No. 3. P. 414–426.
38. Lemsky J. Assessment of NASA Dual Microstructure Heat Treatment Method for Multiple Forging Batch Heat Treatment. Cleveland, OH: NASA Glenn Research Center, 2004. P. 1–9.
39. Gayda J. Dual microstructure heat treatment of a Nickel-base disk alloy assessed. URL: <http://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=200501997532018-09-12T20:15:10+00:00z> (дата обращения: 10.12.2024).
40. Smarsly W. Aero Engine Materials – MTU Aero Engines. URL: [http://www.mtu.de/en/technologies/engineering\\_news](http://www.mtu.de/en/technologies/engineering_news) (дата обращения: 10.12.2024).

#### References

1. Kablov E.N. Aviation Materials Science in the 21st Century. Prospects and Objectives. *Aviation Materials. Selected Works of VIAM 1932–2002*. Moscow: MISiS–VIAM, 2002, pp. 23–47.
2. Kablov E.N., Lomberg B.S., Ospennikova O.G. Creation of Modern Heat-Resistant Materials and Technologies for Their Production for Aviation Engine Building. *Krylya Rodiny*, 2012, no. 3–4, pp. 34–38.
3. Echin A.B., Bondarenko Yu.A., Kolodyazhny M.Yu., Surova V.A. Review of perspective high-temperature superalloys based on refractory non-metallic materials for production of gas turbine engines. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 3 (72), paper no. 03. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 10, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-30-41.
4. Min P.G., Vadeev V.E. The development and introduction into serial production of the new superalloy VZhL125 for the advanced aviation engines vanes. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 10, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-3-16.
5. Narsky A.R., Deynega G.I., Kuzmina I.G. Obtaining a fine-grained structure of castings from nickel superalloys using a cobalt aluminate modifier. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 3 (72), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 10, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-3-14.

6. Kolyadov E.V., Visik E.M., Gerasimov V.V., Bityutskaya O.N. Features of the morphology of the structure of nickel superalloy depending on the values of the axial and radial temperature gradients at the crystallization front. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 2 (75), paper no. 02. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 10, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-15-24.
7. Garibov G.S., Grits N.M. Ways to create new high-heat-resistant granulated alloys for promising aircraft engines. *Zhurnal tekhnologiya legkikh splavov*, 2012, no. 3, pp. 35–44.
8. Egorov D.A. *Research and development of production technology for turbine disk blanks with functionally graded characteristics from granules of heat-resistant nickel alloys*: thesis, Cand. Sc. (Tech.). Moscow, 2016, 221 p.
9. Bocharova A.A., Grits N.M., Kazberovich A.M. Bimetallic disk blanks with functionally graded properties from promising granulated heat-resistant nickel alloys. *Zhurnal tekhnologiya legkikh splavov*, 2013, no. 4, pp. 135–143.
10. 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.
11. Valitov V.A., Akhunova A.Kh., Galieva E.V. et al. The stress-strain state and the microstructure in disk-shaft solid-phase bonds of dissimilar nickel-based alloys. *Journal Letters on materials*, 2017, vol. 7 (2), pp. 180–185. DOI: 10.22226/2410-3535-2017-2-180-185.
12. Akhunova A.Kh., Galieva E.V., Povarova K.B., Bazyleva O.A., Valitov V.A., Dmitriev S.V., Drozdov A.A., Arginbaeva E.G. Modeling of pressure welding of dissimilar cast and deformable nickel-based alloys under conditions of bulk plastic flow. *Fundamentalnye problemy sovremennogo materialovedeniya*, 2016, vol. 13, no. 1, pp. 131–135.
13. Valitov V.A., Povarova K.B., Bazyleva O.A., Drozdov A.A., Ovsepyan S.V., Galieva E.V. Research of solid compound formation during thermal deformation effect on intermetallic Ni<sub>3</sub>Al-alloy with a heat-resistant alloy EP975 and influence on the physical, mechanical and performance properties. *Materials Science Forum*, 2016, vol. 838–839, pp. 523–527. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.838-839.523.
14. Povarova K.B., Valitov V.A., Drozdov A.A., Bazyleva O.A., Galieva E.V., Arginbaeva E.G. Formation of gradient structures in the joint zone of deformable nickel and single-crystal intermetallic alloy during thermodiffusion pressure welding and heat treatment. *Metally*, 2018, no. 1, pp. 48–57.
15. Galieva E.V., Povarova K.B., Drozdov A.A., Valitov V.A. Structure and properties of solid-phase joints of deformable nickel alloy EP975 and single-crystal intermetallic alloy VKNA-25 obtained by pressure welding with a deformation degree of 24% under conditions of superplasticity of the EP975 alloy. *Metally*, 2018, no. 6, pp. 64–72.
16. *Method for manufacturing a bimetallic product*: pat. 2608118 Rus. Federation; appl. 15.07.15; publ. 13.01.17.
17. Valitov V.A., Mulyukov R.R., Lomberg B.S., Ospennikova O.G., Ovsepyan S.V., Utyashev F.Z., Bubnov M.V. Effect of superplastic deformation and heat treatment on the structure and properties of gas turbine engine disks made of heterophase nickel alloys. *Reports All-Rus. Conf. «Modern heat-resistant deformable nickel and intermetallic alloys, methods of their processing»*. Moscow: VIAM, 2015, p. 3.
18. Povarova K.B., Valitov V.A., Ovsepyan S.V., Drozdov A.A., Bazyleva O.A., Valitova E.V. Study of properties and selection of alloys for disks with blades («Bliskov») and the method of their connection. *Metally*, 2014, no. 5, pp. 61–70.
19. *Multi-alloy turbine rotor disk*: pat. 4900635 US; appl. 09.02.89; publ. 13.02.90.
20. *Method for making a compositionally graded gas turbine disk*: pat. 7537725 B2 US; appl. 19.09.05; publ. 26.05.09.
21. *Method for producing a gas turbine engine disk*: pat. 2536124 C1 Rus. Federation; appl. 21.08.13; publ. 20.12.14.
22. *Method for producing a bimetallic disk of a gas turbine engine*: pat. 537335 C1 Rus. Federation; appl. 24.06.13; publ. 01.01.15.
23. *Method for producing a variable structure over the cross-section of a powder blank*: pat. 2455115 C1 Rus. Federation; appl. 17.02.11; publ. 10.07.12.

24. Garibov G.S., Grits N.M., Fedorenko E.A. et al. Study of the possibility of manufacturing gas turbine engine disk blanks with variable structure and functional-gradient properties from granules of different fractions. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2011, no. 4, pp. 41–49.
25. *Powder/wrought alloy composite turbine disc*: pat. 7137787 US; appl. 17.06.04; publ. 21.11.06.
26. *Method of forming a rotor*: pat. 4680160 US; appl. 11.12.85; publ. 14.07.87.
27. *Method of producing turbine disks*: pat. 4608094 US; appl. 18.12.84; publ. 26.08.86.
28. Pravikova L.A., Rudnitsky E.N., Eremenko V.I., Mozolevskaya O.A. Features of the phase composition and microstructure of the transition zone between the constituent alloys in combined blanks made of heat-resistant nickel alloys. *Reports 3rd All-Union Conf. on Granule Metallurgy*. Moscow: VILS Publ. House, 1991, pp. 120–121.
29. Shivarnov N.S. On the role of the transition zone in bimetallic parts made of granulated and monolithic materials obtained by HIP technology. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2017, no. 2, pp. 34–42.
30. *Method of forming fatigue crack resistant nickel base superalloys*: pat. 4816084 US; appl. 15.09.86; publ. 28.03.89.
31. *Method of making superalloy turbine disks having graded coarse and fine grains*: pat. 5312497 US; appl. 31.12.91; publ. 17.05.95.
32. *Method of making high strength superalloy components with graded properties*: pat. 4820358 US; appl. 01.04.87; publ. 11.04.89.
33. *Method of making superalloy turbine disks having graded coarse and fine grains*: pat. 5312497 US; appl. 31.12.91; publ. 17.05.94.
34. *Heat treatment devices and method of operation thereof to produce dual microstructure superalloy disks*: pat. 6660110 US; appl. 08.04.02; publ. 09.12.03.
35. Gayda J., Furrer D. Dual-Microstructure Heat Treatment. *Advanced Materials and Processes*, 2003, vol. 161, no. 7, pp. 36–39.
36. Gayda J., Gabb T., Kantzos P., Furrer D. *Low cost heat treatment process for production of dual microstructure superalloy disks*. Cleveland, OH: NASA Glenn Research Center, 2003, pp. 1–9.
37. Gabb T.P., Kantzos P.T., Telesam J. et al. Fatigue resistance of the grain size transition zone in a dual microstructure superalloy. *International journal of fatigue*, 2011, vol. 33, no. 3, pp. 414–426.
38. Lemsky J. *Assessment of NASA Dual Microstructure Heat Treatment Method for Multiple Forging Batch Heat Treatment*. Cleveland, OH: NASA Glenn Research Center, 2004, pp. 1–9.
39. Gayda J. *Dual microstructure heat treatment of a Nickel-base disk alloy assessed*. Available at: <http://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=200501997532018-09-12T20:15:10+00:00z> (accessed: December 10, 2024).
40. Smarsly W. Aero Engine Materials – MTU Aero Engines. Available at: <https://www.yumpu.com/en/document/view/11154884/aero-engine-materials-mtu-aero-engines> (accessed: December 10, 2024).

**Информация об авторах**

**Востриков Алексей Владимирович**, начальник Научно-исследовательского отделения, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Яшин Максим Сергеевич**, ведущий инженер, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

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

**Information about the authors**

**Alexey V. Vostrikov**, Chief of Scientific Research, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Maxim S. Yashin**, Leading Engineer, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

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

Статья поступила в редакцию 13.02.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 03.03.2025.

The article was submitted 13.02.2025; approved and accepted for publication after reviewing 03.03.2025.