

УДК 669.018.44:669.245

*А.М. Волков<sup>1</sup>, М.М. Карашаев<sup>1</sup>, М.М. Бакрадзе<sup>1</sup>, Т.О. Пустынников<sup>1</sup>***АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОВЫШЕНИЯ  
МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРАНУЛИРУЕМЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ  
НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ДИСКОВ ГТД (обзор)**

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-8-3-8

*Представлен обзор технологических решений, еще не нашедших широкого применения при производстве заготовок дисков ГТД из гранул жаропрочных никелевых сплавов. Рассмотрены методы формирования специфического фазового состава. Приведены способы получения порошков, альтернативные технологиям газовой атомизации и центробежного распыления литых заготовок. На стадии консолидации частиц порошка описаны результаты работ по жидкофазному спеканию. Перечислены некоторые оригинальные методы обработки материала для формирования функционально-градиентной структуры.*

**Ключевые слова:** жаропрочный никелевый сплав, диск ГТД, гранула, механические свойства, горячее изостатическое прессование (ГИП).

*А.М. Volkov<sup>1</sup>, М.М. Karashaev<sup>1</sup>, М.М. Bakradze<sup>1</sup>, Т.О. Pustynnikov<sup>1</sup>***ALTERNATIVE TECHNOLOGIES OF THE INCREASING OF MECHANICAL  
PROPERTIES OF P/M Ni-BASED SUPERALLOYS FOR JET-ENGINE DISK  
APPLICATION (review)**

*The review of technological solutions which not yet has come to wide apply in production of jet-engine disk billets from Ni-based superalloy powder are presented. The methods of formation of particular phase composition are reviewed. The manners of powder production which are alternative to atomizing and PREP techniques are cited. The results of works carried out on liquid-phase sintering at the stage of consolidation of powder particles are described. Some original methods of material treatment for dual microstructure formation are enumerated.*

**Keywords:** Ni-base superalloy, jet-engine disk, powder, mechanical properties, hot isostatic pressing (HIP).

<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**

Повышение механических свойств материала дисков компрессора и турбины высокого давления авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) является одним из способов увеличения ресурса, тяги, экономичности и других ключевых эксплуатационных параметров авиационных силовых установок. Применительно к дисковым жаропрочным никелевым сплавам (ЖНС) основные направления в данной области связаны с усложнением легирования [1], компьютерным моделированием для обеспечения фазовой стабильности и заданных свойств материала [2], использованием микролегирования редкоземельными металлами (РЗМ) [3], внедрением ресурсосберегающих технологий переработки [4] и др. Достаточно длительное время исследуются перспективные методы, основанные на формировании переменной (функционально-градиентной) структуры по сечению заготовок дисков, применении упрочнения волокнами или дисперсными тугоплавкими частицами, специальных видов сварки и т. д. [5].

В дополнение к этому существует ряд оригинальных технологий, которые пока только доведены до стадии прототипов, либо находятся на уровне поисковых исследований и представлены небольшим количеством публикаций. Возможно, не все из рассмотренных в данной статье решений будут доведены до стадии промышленного применения, однако их анализ может быть полезен при разработке новых технологий производства заготовок дисков. Кроме того, несмотря на то, что определенная научная идея на начальном этапе может восприниматься как «фантастическая» или «тупиковая», по прошествии времени или с достижением достаточного уровня развития техники ее внедрение может принести ощутимые результаты. В качестве примеров из истории развития ЖНС можно привести дискуссии по вопросам гетерофазной структуры сплавов, применения литых лопаток вместо деформированных [6], использования гранулируемых сплавов и прочее [7].

В данной статье рассмотрены некоторые альтернативные решения на различных стадиях производства заготовок дисков из гранул – начиная от химических составов сплавов, методов производства порошков, консолидации частиц в компакт и заканчивая методами формирования функционально-градиентной структуры. 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») [8].

### **Формирование специфического фазового состава**

Традиционно дисковые ЖНС состоят из твердого раствора на основе никеля с гранцентрированной кубической решеткой ( $\gamma$ -фаза), интерметаллидной упрочняющей  $\gamma'$ -фазы на основе легированного соединения  $Ni_3Al$ , карбидов и боридов. В малых долях могут содержаться оксиды, неметаллические включения, эвтектические и ТПУ-фазы, однако они зачастую являются побочными продуктами применяемых металлургических технологий и считаются нежелательными.

Подобный фазовый состав современных дисковых сплавов обеспечивается за счет содержания около 55–60% (по массе) Ni, до 20% (по массе) Co, до 15% (по массе) Cr, около 5% (по массе) W, Mo, Al, Ti (каждого), нескольких % (по массе) Nb и Ta, до 1% Hf, микродобавок C, B, V, Zr, Mg. Предлагаются различные варианты дополнительного легирования Re, а также некоторыми РЗМ (Sc, Y, Zr, La, Ce и др.). Практически все остальные стабильные элементы Периодической системы элементов Д.И. Менделеева могут быть отнесены к вредным примесным.

С учетом ограниченных возможностей дальнейшего повышения механических свойств сплавов за счет простого увеличения степени легирования, даже с использованием методов физико-химического моделирования, различные научные коллективы предлагают оригинальные подходы к поиску новых составов для дисков ГТД.

Компанией Rolls-Royce PLC запатентован сплав, отличительной особенностью которого является присутствие в структуре тройной эвтектики на основе  $\delta$ -фазы  $Ni_3Nb$ ,  $\gamma'$ -фазы и  $\gamma$ -твердого раствора [9]. Для формирования подобного фазового состава концентрация Nb увеличена до 16–22% (по массе), что является нетипичным для большинства ЖНС, содержащих 1–3% (по массе) (максимум 5% (по массе)) данного элемента. Новый сплав предлагается использовать для материала дисков, в том числе изготовленных по гранульной технологии, а также лопаток или других деталей, получаемых литьем.

Специалистами ФГУП «ВИАМ» исследованы жаропрочные сплавы с содержанием ~8% (по массе) Al и до 38% (по массе) Co. Обозначены направления повышения длительной прочности подобных сплавов при температурах до 900°C, связанные с легированием никелевой матрицы большим количеством тугоплавких элементов, таких как Ta, Nb, Co [10].

Следует ожидать, что дальнейшее повышение механических свойств дисковых сплавов будет связано не столько с новыми системами легирования, сколько с изменением соотношения отдельных элементов и с совершенствованием оборудования и повышением культуры производства.

### Альтернативные методы производства порошков

В действующей практике для серийного производства заготовок дисков из гранул ЖНС используются в основном два конкурирующих метода распыления. Первоначально в США с середины 1960-х годов для данной технологии начали использовать газовую атомизацию. Метод позволил с высокой производительностью получать порошки с размером частиц  $<100$  мкм [11]. В дальнейшем потребовалось отказаться от использования керамической оснастки с целью снижения содержания примесей кислорода в сплавах. Так были разработаны методы дугового центробежного распыления вращающегося электрода (rotate electrode process – REP) и затем плазменного центробежного распыления вращающейся заготовки (plasma rotate electrode process – PREP). Применение технологии центробежного распыления литых заготовок для дисковых ЖНС позволило получать порошки с высокой сыпучестью, обусловленной отсутствием сателлитов и сферичностью частиц, а также практически лишенные аргонной пористости [12].

Указанные методы производства порошков характеризуются скоростью охлаждения расплава  $\sim 10^4$  °C/с, что обусловлено объемом/сечением получаемых сферических частиц и охлаждающей способностью рабочей среды – аргона или смеси гелия с аргоном. Тем не менее существуют методы получения порошков с размером частиц  $<100$  мкм, характеризующиеся более высокой скоростью охлаждения – на уровне  $10^5$ – $10^7$  °C/с. Последнее обстоятельство может позволить увеличить степень легирования сплавов, снизить размер дендритных ячеек или даже перейти к ячеистой структуре, что будет способствовать повышению однородности химического и фазового состава материала, увеличению механических характеристик и т. д. Несмотря на то, что применительно к дисковым ЖНС подобные исследования проводились с середины 1970-х годов [13], в том числе и в направлении разработки специальных сплавов для условий сверхбыстрой кристаллизации, к настоящему времени они не доведены до стадии изготовления опытных партий.

Среди отечественных публикаций существует ряд работ, выполненных в последние годы с применением серийного сплава ЭП741НП. В опытно-промышленных условиях ОАО «ВИЛС», АО «СМК», АО «Композит», АО «КБХА» производят гранулы данного сплава по технологии PREP для получения заготовок роторных деталей типа дисков для изделий авиационной техники. В качестве альтернативных методов производства порошков предлагаются следующие технологии.

Порошки пластинчато-чешуйчатой формы, полученные центробежным распылением на водоохлаждаемый экран, а также игольчатой формы (дискретные волокна), полученные экстракцией висячей капли, исследованы сотрудниками МАИ (бывший МАТИ) совместно с АО «Композит». В работах изготовлены как экспериментальные заготовки, так и шайба диаметром 260 мм и массой около 10 кг. Показано, что использование порошков пластинчато-чешуйчатой формы позволяет повысить кратковременную прочность сплава ЭП741НП при температуре 900 °C относительно кратковременной прочности материала из стандартных порошков, полученных по технологии PREP [14, 15].

Дискретные волокна этого же сплава, изготовленные методом спиннингования, исследованы специалистами Уральского федерального университета (УрФУ) [16]. Однако данных по микроструктуре компактированного материала и его свойствам в работах авторского коллектива к настоящему времени не представлено.

В целом общими недостатками порошков сверхбыстрой кристаллизации для применения их в заготовках дисков ГТД являются низкая сыпучесть из-за специфической формой частиц, а также высокая стоимость, вызванная относительно малой

производительностью установок распыления. Различные технологические решения, призванные снизить влияние этих недостатков – например, подпрессовка порошка в капсулах перед ГИП, модернизация стандартных установок центробежного распыления для повышения скорости охлаждения частиц и др. – пока не позволили создать альтернативную технологию, успешно конкурирующую со стандартной, использующей сферические порошки газовой атомизации или центробежного распыления литых заготовок.

### Жидкофазное спекание

Как следует из названия, данный способ консолидации проводят при высокой температуре с образованием жидкой фазы на поверхности частиц. Технология успешно используется для порошковых твердосплавных (керметы) и антифрикционных материалов, сплавов на основе железа для постоянных магнитов и т. д. [17]. Достаточно длительное время различными группами ученых Франции [18], Японии [19], США [20] и других стран ведутся работы по применению подобного подхода к дисковым ЖНС.

За рубежом стандартная гранульная технология производства турбинных дисков подразумевает получение цилиндрических заготовок путем компактирования порошка экструзией капсул с гранулами или горячим изостатическим прессованием (ГИП), дальнейшую экструзию прутка с высокой степенью деформации ~5:1 и/или изотермическую деформацию в вакуумных камерах с использованием молибденовых штампов. Подобное высокотехнологичное оборудование, а также большое количество технологических переделов существенно увеличивают стоимость конечной продукции по сравнению со стандартным маршрутом производства дисков ГТД из среднелегированных ЖНС, который состоит из выплавки, переплава, гомогенизации слитка, предварительной протяжки/ковки/осадки, горячей штамповки заготовки.

Среди преимуществ технологии жидкофазного спекания указывается возможность сокращения времени горячего изостатического прессования [21] или вообще отказ от данной операции [18]. Объясняется это тем, что диффузия и, соответственно, консолидация частиц в присутствии жидкой фазы идут значительно активнее, чем в твердой фазе, как это имеет место в стандартной гранульной технологии. Благодаря этому обстоятельству также предлагается устранять границы исходных гранул [20], которые могут быть вызваны наличием оксикарибидов на поверхности частиц порошка.

Несмотря на большое количество исследований, проведенных на сплавах Inconel 100, N18 и Udimet 720 невысокой степени легирования, а также на сплавах Rene 88DT, Rene 95, RR1000 и ЭП741НП с более сложным химическим составом, отсутствуют работы по высоколегированным современным дисковым сплавам типа Me3. Не приводятся также данные по обеспечению равномерности оплавления гранул во всем объеме крупногабаритного изделия (капсулы) при условии, что частицы порошка даже после виброуплотнения имеют только точечный контакт, и из-за этого вся засыпка по объему имеет достаточно низкую теплопроводность.

### Методы формирования функционально-градиентной структуры

Обеспечение различного уровня механических свойств в разных зонах заготовки турбинного диска в соответствии с действующими эксплуатационными нагрузками является перспективным методом для более полного использования потенциала ЖНС. Наиболее исследованные технологические решения связаны с использованием гранул различных фракций/сплавов, с регламентированной рекристаллизацией за счет градиентного нагрева, с локальной термической обработкой, с формированием неразъемных, в том числе биметаллических, соединений ступицы и обода. Кроме того, существует ряд оригинальных решений.

Выдвинута идея формирования различного размера зерна путем контролируемой диффузии бора в ЖНС с содержанием 0,01–0,10% (по массе) углерода и 0,02–0,08% (по массе) бора [22]. Предлагается заготовку, близкую по форме к конечной

детали, нагревать при температуре  $>980^{\circ}\text{C}$  в течение нескольких часов. По мнению заявителей, диффузия бора из сплава в атмосферу печи позволит в ряде областей заготовки увеличить размер  $\gamma$ -зерен. При необходимости отдельные зоны заготовки могут быть изолированы для торможения данного процесса. Кроме реализации данного метода на штампованных лопатках, предлагается использовать его в порошковой технологии, например, для дисков.

Коллективом исследователей из компании General Electric предложен метод получения градиентных зеренных структур на различных жаропрочных авиационных материалах, в том числе дисковых ЖНС [23]. Особенностью является формирование в результате химико-термической обработки дисперсных частиц, сдерживающих рост зерен. Например, деталь из ЖНС, содержащего в составе иттрий, помещают в емкость, заполненную порошком оксида никеля. Сборку помещают в печь с инертной атмосферой и обеспечивают приток кислорода с требуемым парциальным давлением. Количество оксидов иттрия, образовавшихся в результате внутреннего окисления, может регулироваться градиентом температур и давлений.

Описан метод плавного увеличения размера зерна вдоль радиуса дисковой заготовки [24]. Стальную капсулу, оформляющую ступичную и ободную часть диска, приводят во вращение. Заполнение капсулы ведут гранулами крупной и мелкой фракций двух различных жаропрочных сплавов. Их разделение по объему капсулы обеспечивается за счет центробежных сил. После полного заполнения вращение прекращают, капсулу герметизируют. Формирование увеличенных зерен в ободке осуществляется путем локализации более крупных гранул в данной зоне. Далее проводят горячее изостатическое прессование, термообработку и последующие операции, формируя градиентную структуру.

Применение заготовок дисков с функционально-градиентными свойствами в целом является дискуссионным моментом, при котором необходимо проанализировать соотношение выигрыша в эксплуатационных характеристиках из-за локального повышения свойств и увеличение трудоемкости изготовления. С учетом того, что наиболее исследованные технологии формирования переменной структуры, такие как регламентированная рекристаллизация и локальная термообработка, использование гранул различных фракций, биметаллические диски и т. д., все еще не получили широкого внедрения, использование альтернативных технологий, описанных ранее, в промышленном масштабе представляется крайне затруднительным.

### Заключения

Основные направления развития технологий получения заготовок дисков в настоящее время связаны с микролегированием, гранульной металлургией, изотермической деформацией, динамической рекристаллизацией, термической обработкой, созданием конструкций типа «блиск» и т. д. Помимо этого, в данной области ведутся исследования по направлениям, существенно отличающимся от серийных.

Однако более рациональными представляются мероприятия, связанные со строгим регламентированием структуры материалов, необходимостью совершенствования оборудования и процессов промышленного производства, в том числе с использованием ротационной сварки трением, деформацией компактированной заготовки, применением высокочувствительных методов неразрушающего контроля заготовок на различных этапах технологии.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Чабина Е.Б., Ломберг Б.С., Филонова Е.В., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М. Изменение структурно-фазового состояния жаропрочного деформируемого никелевого сплава при легировании танталом и рением // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №9. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.07.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-9-3-3.

2. Логунов А.В., Шмотин Ю.Н., Данилов Д.В. Методологические основы автоматизированного проектирования жаропрочных сплавов на никелевой основе. Ч. 1 // Технология металлов. 2014. №5. С. 3–9.
3. Чабина Е.Б. Влияние микролегирования лантаноидами на особенности формирования структуры границ зерен и межфазных границ  $\gamma/\gamma'$  жаропрочного никелевого сплава типа ВЖ175 // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2017. №2. Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.07.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-2-9-9.
4. Разуваев Е.И., Бубнов М.В., Бакрадзе М.М., Сидоров С.А. ГИП и деформация гранулированных жаропрочных никелевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2016. №S1 (43). С. 80–86. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S1-80-86.
5. Карасев О.И., Вишневский К.О., Веселитская Н.Н., Великанова Н.П. Форсайт развития авиационной науки и технологий до 2030 года и на дальнейшую перспективу. М.: ЦАГИ, 2014. 280 с.
6. Каблов Е.Н., Бронфин М.Б. Эффект С.Т. Кишкина, или почему структура жаропрочных никелевых сплавов должна быть гетерофазной // Литейные жаропрочные сплавы. Эффект С.Т. Кишкина. М.: Наука, 2006. С. 7–14.
7. Логунов А.В., Шмотин Ю.Н. Современные жаропрочные никелевые сплавы для дисков газовых турбин (материалы и технологии). М.: Наука и технология, 2013. 264 с.
8. 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.
9. A ternary nickel eutectic alloy: pat. EP 2065479A2; filed 21.10.08; publ. 03.06.09.
10. Летников М.Н., Ломберг Б.С., Овсеян С.В. Исследование композиций системы Ni–Al–Co при разработке нового жаропрочного деформируемого интерметаллидного сплава // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №10. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.07.2019).
11. Smythe J. Superalloy powders: An amazing history // Advanced Materials & Processes. 2008. November. P. 53–55.
12. Кошелев В.Я., Ходкин В.И., Мусиенко В.Т. Исследование свойств гранул жаропрочных никелевых сплавов, полученных различными методами распыления // Металловедение и обработка титановых и жаропрочных сплавов. 1991. С. 333–340.
13. Гессингер Г.Х. Порошковая металлургия жаропрочных сплавов. Пер. с англ. Челябинск: Металлургия, 1988. 320 с.
14. Серов М.М., Казберович А.М., Бер Л.Б., Коняев В.С., Тармосин Е.В. Сравнительные исследования структуры дискретных волокон и гранул из жаропрочного никелевого сплава ЭП741НП // Технология легких сплавов. 2012. №2. С. 48–52.
15. Тармосин Е.В., Логачев А.В., Степкин Е.П., Серов М.М. Исследование процесса получения компактных заготовок из быстрозакаленных частиц сплава ЭП741НП // Вакуумная техника и технология. 2014. Т. 24. №2. С. 135–140.
16. Тягунов А.Г., Барышев Е.Е., Тягунов Г.В., Шамова К.Ю. Оптимизация температурного режима получения волокон из жаропрочного сплава ЭП741НП // Электрометаллургия. 2016. №7. С. 3–8.
17. Либенсон Г.А., Лопатин В.Ю., Комарницкий Г.В. Процессы порошковой металлургии: учеб. для вузов в 2 т. М.: МИСИС, 2002. Т. 2: Формование и спекание, 320 с.
18. Jeandin M., Bienvenu Y., Koutny J.L. Liquid phase sintering of nickel base superalloys // Superalloys–1984. 1984. P. 467–476.
19. Morishita M., Nagai H., Shoji K. Liquid phase sintering of Ni-base superalloy IN-100 // Transactions of Japan Institute of Metals. 1986. Vol. 27. No 1. P. 61–69.
20. Pierron X., Banik A., Maurer G.E., Lemsky J., Furrer D.U. Sub-solidus HIP process for P/M superalloy conventional billet conversation // Superalloys–2000. 2000. P. 425–433.
21. Братухин А.Г., Масленков С.Б., Логунов А.В. Физико-химические основы технологии жидкофазного спекания гранул // Материаловедение. 1997. №2. С. 53–56.
22. Method of selective grain growth in nickel-based superalloys by controlled boron diffusion: pat. US 4401480; filed 19.10.81; publ. 30.08.83.
23. Graded metallic structures and method of forming and related articles: application US 2008/0142126 A1; filed 19.06.08.
24. Multi-alloy turbine rotor disk: pat. US 4900635; filed 09.02.89; publ. 13.02.90.