

УДК 621.762:669.24

А.М. Волков¹, А.В. Востриков¹, М.М. Бакрадзе¹

ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ И ОСОБЕННОСТИ ЛЕГИРОВАНИЯ ГРАНУЛИРУЕМЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ДИСКОВ ГТД

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-2-2

Для создания новых авиационных изделий необходимо усовершенствование применяемых сплавов. Усложнение легирования дисковых жаропрочных сплавов на основе никеля создает технические трудности при их производстве и, в частности, при обработке давлением. Порошковая металлургия позволяет успешно решить эту проблему и реализовать комплекс механических характеристик, который крайне трудно обеспечить при традиционной технологии производства. Приведены основные положения, которыми руководствовались разработчики отечественных дисковых гранулируемых сплавов, а также указаны перспективные направления работ, которые реализуются во ФГУП «ВИАМ».

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 10.2. «Изотермическая деформация на воздухе нового поколения гетерофазных труднодеформируемых жаропрочных сплавов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Ключевые слова: заготовки дисков, ГТД, гранулы, жаропрочные никелевые сплавы, легирующие элементы, структура, механические свойства.

The development of new aviation products requires the improvement of applicable alloys. Alloying complication of disk Ni-base superalloys leads to technical difficulties in their production and particularly during forging. Powder metallurgy allows successfully solving this problem and achieving mechanical characteristic that are very difficult to provide with traditional production methods. This article presents the basic principles of Russian P/M disk alloys development and also points the perspective directions of research in FSUE «VIAM».

The work is executed within implementation of the complex scientific direction 10.2. «Isothermal deformation on air of new generation heterophase difficult-to-form superalloys» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].

Keywords: disk billet, jet-engine, powder, Ni-base superalloys, alloying elements, microstructure, mechanical properties.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Развитие авиастроения, создание перспективных изделий авиационной техники и улучшение экономической ситуации в России невозможны без разработки и создания новых материалов с повышенными служебными характеристиками, недостижимыми ранее. Увеличение эффективности авиационных двигателей во многом зависит от роста температурно-силовых параметров эксплуатации отдельных деталей ГТД. К основным деталям, включающим в себя турбинные и компрессорные диски, всегда предъявлялись исключительно высокие требования по уровню механических свойств, фазовой ста-

бильности и показателям надежности, что подразумевает использование специальных подходов при разработке сплавов для заготовок дисков.

Один из первых отечественных жаропрочных сплавов на основе никеля (ЭИ437), разработанный специалистами ФГУП «ВИАМ» под руководством академика С.Т. Кишкина в конце 1940-х годов, позволил открыть новое направление в развитии отечественного авиационного материаловедения. Гетерофазная структура сплава, состоящая из твердого раствора γ -Ni и содержащая когерентные частицы упорядоченной γ' -фазы (Ni₃Al), стала базовой для всех жаропрочных никелевых сплавов [2–4].

Таблица 1

Химический состав некоторых наиболее распространенных дисковых жаропрочных никелевых сплавов

Сплав	Содержание элементов, % (по массе)										
	Ni	Cr	Co	W	Mo	Al	Ti	Nb	V	B	C
ЭИ437БУ	Основа	21,0	–	–	–	0,8	2,6	–	–	0,03	0,07
ЭИ698	Основа	14,5	–	0,2	3,0	1,5	2,5	2,1	–	0,08	0,05
ЭП742	Основа	14,0	10,0	–	5,0	2,6	2,6	2,6	0,2	0,01	0,06

Таблица 2

Механические свойства и года паспортизации наиболее распространенных дисковых деформируемых жаропрочных никелевых сплавов

Сплав (год паспортизации)	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ , %	КСУ, Дж/см ²	Длительная прочность, МПа, при температуре, °С		МЦУ: σ_0 , МПа (при 650°С; $R=0$; $f=1$ Гц; $N=5 \cdot 10^3$ цикл)
	МПа				650	750	
ЭИ437БУ (1953 г.)	980	665	13	30	610	340	715
ЭИ698 (1958 г.)	1160	725	14	40	715	410	785
ЭП742 (1969 г.)	1200	815	14	40	815	510	820

Проблема повышения эксплуатационных характеристик сплавов решалась не только путем усложнения химического состава: увеличением степени легирования твердого раствора добавками Cr, Co, W, Mo и γ' -фазы с использованием Ti, Nb (табл. 1). Одновременно шло развитие технологии производства изделий. Однако рост прочностных свойств сплавов (табл. 2) затруднял деформацию заготовок, полученных из слитков, что требовало разработки специальных схем горячей штамповки. Увеличение содержания легирующих элементов привело к необходимости использования двойного или тройного переплавов для исключения ликвации и других дефектов, характерных для слитков [5, 6].

Материалы и методы

Для совместного решения обозначенных выше проблем: расширения допустимых интервалов легирования, сохранения фазовой и структурной стабильности, уменьшения влияния ликваций, а также для снижения трудоемкости изготовления крупногабаритных заготовок дисков, была применена технология металлургии гранул. Первыми работами специалистов ВИЛС и ВИАМ, проведенными на лабораторной установке ВГУ-1 при исследовании компактированного материала после центробежного распыления литых прутков из сплавов типа ЖС6У и ЭП741, была обоснована необходимость создания специальных химических составов гранулируемых сплавов, которые бы учитывали особенности гранульной технологии и обеспечивали в дальнейшем формирование оптимальной структуры готовых изделий [7].

Изготовление заготовок дисков ГТД методом металлургии гранул было внедрено в производство в начале 1980-х годов под руководством академика А.Ф. Белова во Всесоюзном (ныне Всероссийском) институте легких сплавов [8, 9]. Первым отечественным гранулируемым дисковым сплавом стал сплав ЭП741П системы Ni–Co–Cr–W–Al–Mo–Ti–Nb, созданный на основе деформируемого сплава базового состава (табл. 3).

Таблица 3

Химический состав деформируемого и гранулируемых сплавов типа ЭП741

Сплав	Содержание элементов, % (по массе)										
	Ni	Cr	Co	W	Mo	Al	Ti	Nb	Hf	B	C
ЭП741	Основа	9,2	16,0	6,7	2,2	4,8	1,4	1,7	–	0,02	0,08
ЭП741П	Основа	9,7	16,0	6,7	2,6	4,8	1,5	1,4	–	0,02	0,06
ЭП741НП	Основа	8,7	15,7	5,5	3,8	5,0	1,8	2,6	0,3	0,015	0,04

Структурной особенностью сплава ЭП741 базового состава после центробежного распыления и горячего прессования было наличие границ исходных гранул, через которые не прорастали рекристаллизованные зерна. Одной из причин таких структурных аномалий являлись частицы карбидов, которые, образуясь на поверхностях гранул при их распылении, в дальнейшем препятствовали полной консолидации материала. Для устранения этого дефекта в гранулируемом сплаве ЭП741П было несколько увеличено содержание карбидообразующих элементов (Cr, Mo, Ti) и снижена концентрация C (с 0,08 до 0,06% (по массе)) по сравнению с деформируемым базовым сплавом (см. табл. 3).

Тем не менее, общий уровень механических свойств сплава ЭП741П был ниже, чем уровень аналогичных характеристик, обеспечиваемый деформируемым базовым сплавом ЭП741 (табл. 4), но при этом близок к значениям, полученным на сплаве ЭП742, уже освоенном в серийном производстве (см. табл. 2). Успехи гранульной металлургии применительно к производству заготовок турбинных дисков продемонстрировали перспективность проводимых исследований и необходимость их дальнейшего развития.

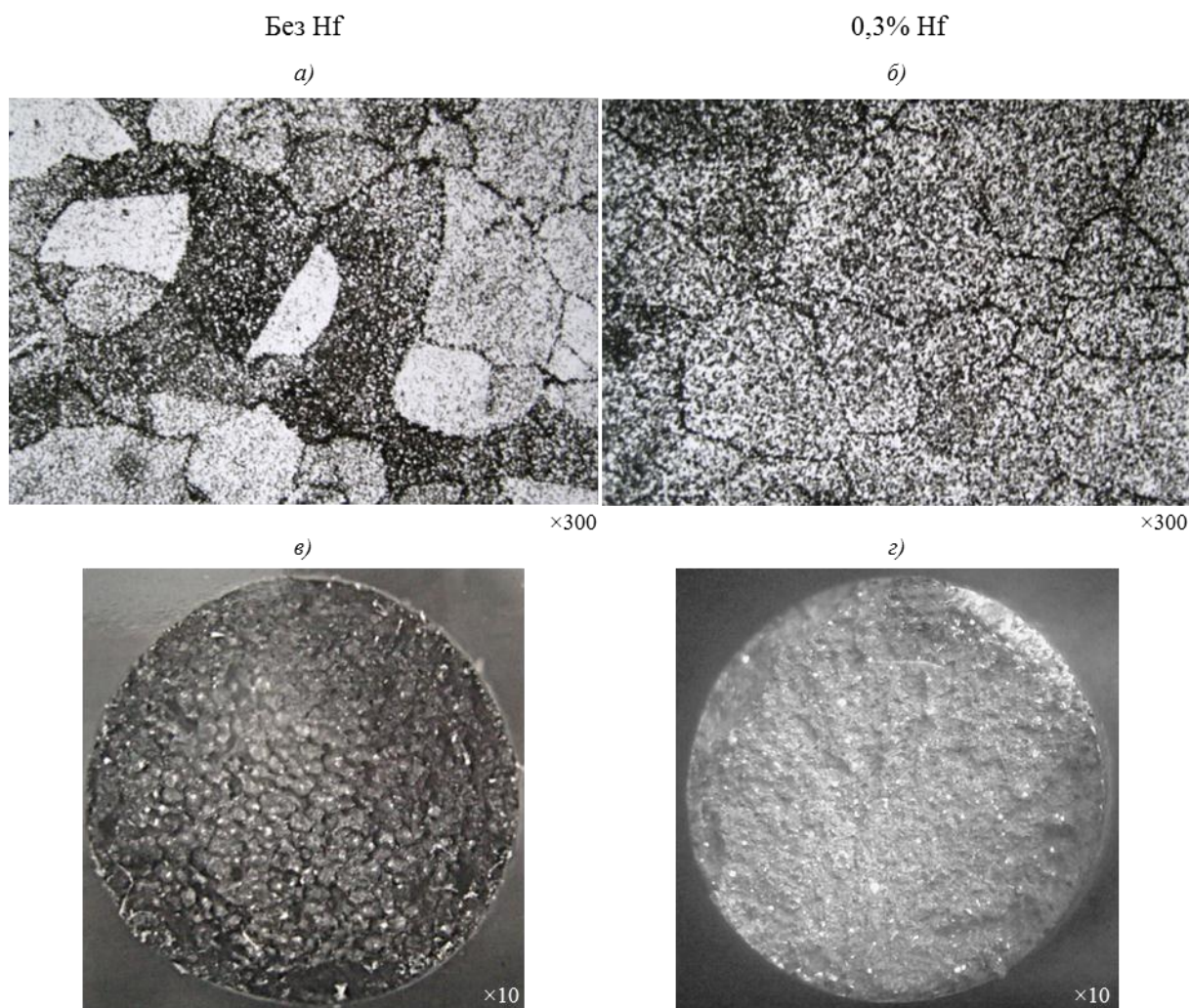
Таблица 4

Механические свойства и года паспортизации деформируемого и гранулируемых сплавов типа ЭП741

Сплав (год паспортизации)	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ , %	КСУ, Дж/см ²	Длительная прочность, МПа, при температуре, °С		МЦУ: σ_0 , МПа (при 650°С; R=0; f=1 Гц; N=5·10 ³ цикл)
	МПа				650	750	
ЭП741 (1971 г.)	1375	980	15	40	980	660	885
ЭП741П (1979 г.)	1225	785	13	50	885	590	910
ЭП741НП (1981 г.)	1355	885	17	45	1015	685	1030
ЭП741НП (1995 г.)*	1420	1025	20	45	1000	660	1060

* Дополнение к паспорту.

При разработке более совершенного сплава ЭП741НП содержание карбидообразующих элементов увеличили еще в большей степени, а концентрацию C снизили до 0,04% (по массе). Принципиальным нововведением стала добавка Hf, образующего стабильные карбиды типа MeC, что позволило устранить карбидные сетки по границам исходных гранул в структуре, а также гранулы в изломе образцов (см. рисунок).



Структура и излом гранулируемого сплава типа ЭП741П с добавкой 0,3% (по массе) Hf (*б, г*) и без нее (*а, в*): *а, б* – травление на γ' -фазу; *в, г* – излом образца после испытаний при растяжении

Механические свойства сплава ЭП741НП были гораздо ближе к значениям свойств деформируемых сплавов-аналогов. Кроме того, гранулируемый сплав обладал существенными преимуществами, заключающимися в снижении трудоемкости производства и их стоимости, повышении КИМ заготовок и другими [10]. Последовательными улучшениями технологии производства (уменьшение размера гранул, повышение чистоты по кислороду, корректировка режимов ГИП и термической обработки и т. п.), свойства сплава увеличились до значений, превышающих значения свойств сплавов ЭП741 и ЭП742. На материал, полученный по оптимизированной технологии производства, было выпущено дополнение к паспорту. Сплав ЭП741НП был принят в качестве материала заготовок особо ответственных высоконагруженных дисков и валов авиационных ГТД как военного (двигатели РД-33, АЛ-31, АИ-222 и др.), так и военно-транспортного и гражданского назначений (двигатели в ПС-90, ТВ7-117 и др.) [11].

В ВИЛС были созданы гранулируемые модификации сплавов ЭИ698П, ЭП962П и ЭП975П. Однако в последующем для решения перспективных задач авиационного двигателестроения потребовались сплавы, обеспечивающие еще более высокие эксплуатационные характеристики.

Результаты

Дальнейшим развитием направления по созданию гранулируемых жаропрочных никелевых сплавов стал сплав ВВ750П, который разработан в результате обширных наработок по сплавам предыдущих поколений (ЭП471НП, ЭП962П, ЭП975П). На заготовках дисков из гранул данного сплава были обеспечены значения прочности 1520 МПа (при 20°C) и жаропрочности 1080 (при 650°C) и 735 МПа (при 750°C), что в комплексе превышало показатели сплавов-аналогов [12]. В 2011 г. в ВИАМ проведена паспортизация сплава ВВ750П на полноразмерных заготовках дисков КВД. Новый жаропрочный сплав был также паспортизован в варианте ГИП+регламентированная деформация, что позволило обеспечить на сплаве ВВ750ПД на 5–7% более высокие показатели прочности и сопротивления МЦУ.

В проекте «Перспективный двигатель тягой 14 тонн» разработки АО «Авиадвигатель» (г. Пермь) выдвинуты еще более высокие требования к материалам турбинных дисков. С целью обеспечения предела прочности сплава более 1580 МПа и длительной прочности 1080 МПа при 650°C, для разработки нового гранулируемого сплава взят за основу наиболее высокопрочный на тот момент и освоенный в производстве деформируемый сплав ЭК151 разработки ВИАМ [13, 14]. С помощью корректировки содержания Al, микролегирующих элементов и добавления Hf был создан сплав ВВ751П, который успешно решил поставленные перед ним задачи и был принят в качестве материала дисков последних ступеней компрессора и первых ступеней турбины нового пассажирского двигателя ПД-14 [15, 16].

Несмотря на незначительные различия в химическом составе сплавов ЭК151 и ВВ751П вследствие использования разных технологий производства заготовок дисков (изотермическая штамповка в условиях сверхпластичности и гранульная металлургия соответственно), порошковый сплав обеспечил более высокие механические свойства: прочностные характеристики увеличены на 5%, а длительная прочность при 650°C на 5–7% (до 1080 МПа). Это в очередной раз подтвердило перспективность технологии металлургии гранул, а также правильность примененной стратегии добавления сильных карбидообразующих элементов (Hf и других) в гранулируемые сплавы.

Обсуждение и заключения

Дальнейшее развитие технологии металлургии гранул может рассматриваться не только как создание новых сплавов, еще более легированных и обладающих повышенными механическими свойствами. Учитывая опыт специалистов ВИАМ по обработке давлением сложнолегированных труднодеформируемых жаропрочных сплавов на основе никеля, металлургия гранул может быть использована в комбинации с последующей изотермической штамповкой дисковых заготовок в условиях сверхпластичности [17].

В существующей технологии производства заготовок дисков для создания благоприятной структуры жаропрочного никелевого сплава, обеспечивающей реализацию эффекта сверхпластичности при изотермической объемной штамповке, необходима специальная подготовка исходных деформируемых заготовок. В настоящее время для производства малоразмерных заготовок дисков в ВИАМ используются мерные слитки двойного переплава или прутки после прессования с высокой степенью вытяжки [18]. Однако производство крупных исходных заготовок под штамповку с регламентированной структурой для изготовления крупногабаритных (диаметром 600 мм и более) штамповок дисков представляет определенные технические трудности.

В этом случае металлургия гранул может заменить специальные процессы выплавки и предварительной обработки давлением для формирования благоприятной структуры материала, проявляющей сверхпластичность при изотермической штамповке.

Специалистами ВИАМ в 2015 г. проведены исследования технологии производства новых жаропрочных никелевых сплавов для дисков турбин в гранульном варианте. Разработана технология получения гранул сплава типа ВЖ175 методом газоструйного распыления (атомизации) аргоном на установке HERMIGA 10/100 VI. Получены опытные партии сферических гранул, достигнут выход годного на уровне 65% при распылении на фракцию 63 мкм, что соответствует лучшим зарубежным достижениям. По результатам химического анализа гранул после физико-механической обработки установлено, что для гранул фракцией 63 мкм среднее содержание газовых примесей составляет [O]=0,008% (по массе), [N]=0,0005% (по массе).

После горячего изостатического прессования и стандартной термической обработки материал из гранул сплава типа ВЖ175 обеспечил механические характеристики на уровне паспортных значений и норм технических условий на штамповки дисков, изготовленные по традиционной технологии (вакуумная индукционная выплавка+вакуумно-дуговой переплав+изотермическая штамповка). Полученные результаты продемонстрировали принципиальную возможность проведения подобных исследований в ВИАМ. Работы в данном направлении будут продолжены.

ЛИТЕРАТУРА

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. Каблов Е.Н. Основатель отечественной школы высокотемпературных авиационных конструкционных материалов. К 100-летию со дня рождения академика С.Т. Кишкина // Крылья Родины. 2006. №5. С. 6.
3. 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.
4. Летников М.Н., Ломберг Б.С., Овсепян 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: 08.08.2016).
5. Разуваев Е.И., Моисеев Н.В., Капитаненко Д.В., Бубнов М.В. Современные технологии обработки металлов давлением // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №2. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 08.08.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-2-3-3.
6. Ломберг Б.С., Бакрадзе М.М., Чабина Е.Б., Филонова Е.В. Взаимосвязь структуры и свойств высокожаропрочных никелевых сплавов для дисков газотурбинных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2011. №2. С. 25–30.
7. Белов А.Ф., Аношкин Н.Ф., Фаткуллин О.Х. Структура и свойства гранулируемых никелевых сплавов. М.: Metallurgia. 1984. 128 с.
8. Задерей А.Г. Феномен академика А.Ф. Белова // Технология легких сплавов. 2006. №3. С. 37–40.
9. Из научного наследия академика А.Ф. Белова (К 105-летию со дня рождения) // Технология легких сплавов. 2011. №1. С. 5–7.
10. Иноземцев А.А., Аношкин Н.Ф., Башкатов И.Г., Гарибов Г.С., Коряковцев А.С. Применение дисков из гранул жаропрочных никелевых сплавов в серийных ГТД авиационной и наземной техники // Перспективные технологии легких и специальных сплавов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. С. 371–376.
11. Гарибов Г.С. Современный уровень развития порошковой металлургии жаропрочных никелевых сплавов // Технология легких сплавов. 2000. №6. С. 58–68.

12. Гарибов Г.С., Гриц Н.М., Востриков А.В., Федоренко Е.А. Крупногабаритные диски из гранул нового высокожаропрочного сплава ВВ750П для перспективных ГТД // Технология легких сплавов. 2008. №1. С. 31–36.
13. Бакрадзе М.М., Овсепян С.В., Шугаев С.А., Летников М.Н. Влияние режимов закалки на структуру и свойства штамповок дисков из жаропрочного никелевого сплава ЭК151-ИД // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №9. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 08.08.2016).
14. 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: 08.08.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-9-3-3.
15. Гарибов Г.С., Гриц Н.М., Востриков А.В., Федоренко Е.А. Создание нового высокопрочного сплава ВВ751П для перспективных газотурбинных двигателей // Технология легких сплавов. 2009. №1. С. 34–39.
16. Гарибов Г.С., Гриц Н.М., Волков А.М., Востриков А.В., Федоренко Е.А. Металловедческие аспекты производства заготовок дисков из гранулируемых жаропрочных никелевых сплавов методом ГИП // Технология легких сплавов. 2014. №3. С. 54–59.
17. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Комплексная инновационная технология изотермической штамповки на воздухе в режиме сверхпластичности дисков из супержаропрочных сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 129–141.
18. Пономаренко Д.А., Моисеев Н.В., Скугорев А.В. Штамповка дисков ГТД из жаропрочных сплавов на изотермических прессах // Авиационные материалы и технологии. 2013. №1. С. 13–16.