

PACS: 61.66.Dk, 62.20.-x

И.П. Семенова¹, В.В. Полякова¹, Р.Р. Валиев¹, Г.И. Рааб¹,
Н.Ф. Измайлова²

МИКРОСТРУКТУРА И СВОЙСТВА ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ГТД, ПОЛУЧЕННЫХ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКОЙ ИЗ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОГО СПЛАВА ВТ6

¹Институт физики перспективных материалов
Уфимского государственного авиационного технического университета
ул. К. Маркса, 12, г. Уфа, 450000, Россия

²ОАО «Уфимское моторостроительное производственное объединение»
ул. Ферина, 2, г. Уфа, 450000, Россия

Статья поступила в редакцию 13 октября 2011 года

Представлены результаты исследований механических свойств и микроструктуры лопаток газотурбинного двигателя (ГТД) из сплава ВТ6, изготовленных объемной изотермической штамповкой (ИЗШ) из заготовки с ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой, полученной методами интенсивной пластической деформации (ИПД). Показана принципиальная возможность формообразования лопатки из УМЗ-заготовки объемной штамповкой при пониженных температурах и, как следствие, достижения повышенных значений прочности и сопротивления усталости за счет формирования в штамповке однородной структуры с размером зерен менее 1 мкм по сравнению с лопатками, полученными по серийной технологии.

Ключевые слова: титановый сплав ВТ6, ультрамелкозернистая структура, интенсивная пластическая деформация, лопатка компрессора низкого давления, объемная штамповка

Введение

Повышение эксплуатационной надежности ГТД в условиях больших ресурсов является важной проблемой современного машиностроения. Лопатки ГТД – наиболее массовые и дорогостоящие детали. Каждый аварийный выход ГТД вследствие усталостных повреждений и эрозионного износа лопаток или снижения их технических характеристик ниже допустимого уровня, как правило, влечет за собой большие материальные убытки, а в отдельных случаях приводит к катастрофическим последствиям.

Лопатки ГТД работают в сложных эксплуатационных условиях высоких статических и динамических нагрузок, эрозионных, коррозионных и температурных воздействий. В целом к ним предъявляется целый ряд технических

требований относительно статической прочности, сопротивления многоцикло-вой и малоцикло-вой усталости, ударной вязкости, длительной прочности при эксплуатационных температурах, чувствительности к концентраторам напряжений и др. [1]. Если температура эксплуатации в компрессоре или спрямляющем аппарате ГТД не превышает 450°C, то предпочтение отдается лопаткам из титановых сплавов, обладающих более высокой удельной прочностью и коррозионной стойкостью по сравнению с жаропрочными сталями и никелевыми сплавами [1].

Исследования последних двух десятилетий показали, что эффективным способом повышения механических свойств металлов и сплавов является формирование УМЗ-наноструктур с размером зерен в субмикро- и нанокристаллическом диапазоне методами ИПД [2,3]. Например, титановые материалы с размером зерен от 1 μm до 100 nm и менее представляют собой большой интерес благодаря их уникальным физико-механическим свойствам: высокой прочности, усталостной прочности, износостойкости, низкотемпературной и/или высокоскоростной сверхпластичности [2–5].

Применение наноструктурных высокопрочных титановых сплавов представляет значительный интерес для изготовления таких ответственных изделий, как лопатки, для которых критическими свойствами, определяющими ресурс и надежность изделий, являются прочность, выносливость и износостойкость. Кроме того, проявление сверхпластичности наноструктурных сплавов при более низких температурах и более высоких скоростях деформации является технологически привлекательным для формообразования лопатки, так как традиционной технологией получения заготовок лопаток из титановых сплавов, имеющих достаточно сложную поверхностную конфигурацию, является объемная штамповка.

В этой связи цель данной работы – исследование возможности повышения усталостных свойств лопаток компрессора низкого давления из сплава ВТ6 за счет формирования в ней УМЗ-структуры путем ИПД и последующей ИЗШ заготовок.

Материалы и методы исследования

Для проведения исследований был использован сплав ВТ6 (Ti-основа, Al – 6.6%; V – 4.9%; Zr – 0.02%; Si – 0.033%; Fe – 0.18%; C – 0.007%; O₂ – 0.17%; N₂ – 0.01%; H₂ – 0.002%) производства ВСМПО в соответствии с ОСТ 1 900006–86. Температура полиморфного превращения $T_{p.tr}$ в сплаве составляет $975 \pm 5^\circ\text{C}$.

Заготовки из сплава ВТ6 диаметром 20 mm и длиной 135 mm предварительно получали по ранее разработанной технологии равноканальным угловым прессованием (РКУП) на оснастке с углом пересечения каналов $\varphi = 120^\circ$ при температуре 700°C и экструзии при 300°C [6]. Заготовки после данной ИПД-обработки представлены на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид заготовок после ИПД-обработки

Рис. 2. Схема вырезки образцов из лопатки, полученной из УМЗ-сплава ВТ6

Полученные заготовки после механической обточкой были нагреты до $T = 780^\circ\text{C}$ в течение 20 min и подвергнуты ИЗШ при $T = 780 \pm 10^\circ\text{C}$ за 1 переход при достижении степени деформации не менее 70%. Скорость деформации при этом составляла в среднем не менее 10^{-2} s^{-1} . Последующая калибровка лопаток производилась при $T = 620\text{--}650^\circ\text{C}$. Режим ИЗШ (температура, скорость и степень деформации) был выбран на основании компьютерного моделирования и возможности реализации данного процесса на существующем оборудовании [7].

Лопатки из обычного сплава ВТ6 были получены по серийной технологии штамповки при температуре $920 \pm 10^\circ\text{C}$. Образцы для механических испытаний вырезали из замковой части и пера лопатки. Схема вырезки представлена на рис. 2.

Для исследования микроструктуры использовали оптическую, растровую (РЭМ) и просвечивающую электронную микроскопию (ПЭМ). Тонкие фольги для ПЭМ были получены электроискровой вырезкой пластинок толщиной 0.8–1.0 mm, механическим утонением с последующим электролитическим полированием при отрицательных температурах. Рентгенофазовый структурный анализ проводили на дифрактометре ДРОН-4 с использованием монохроматизированного $\text{Cu } K_\alpha$ -излучения в интервале углов $2\theta = 20\text{--}100^\circ$. Для устранения влияния текстуры образцы вращали перпендикулярно оси съемки.

Механические испытания на растяжение цилиндрических образцов с длиной базы 15 mm и диаметром 3 mm, вырезанных из замковой части, проводили на разрывной машине Instron при комнатной температуре со скоростью деформации $\dot{\epsilon} = 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. Из пера лопатки были вырезаны плоские образцы с поперечным сечением $2 \times 4 \text{ mm}$, которые испытывали на малой разрывной машине для малых образцов со скоростью деформации $\dot{\epsilon} = 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. Для каждого состояния было испытано не менее 3 образцов.

Результаты исследования и их обсуждение

Микроструктура и механические свойства заготовки из сплава ВТ6, полученной ИПД-обработкой

На рис. 3 приведены микроструктуры сплава ВТ6 в состоянии поставки (а) и после ИПД-обработки, включающей РКУП и экструзию (б, в).

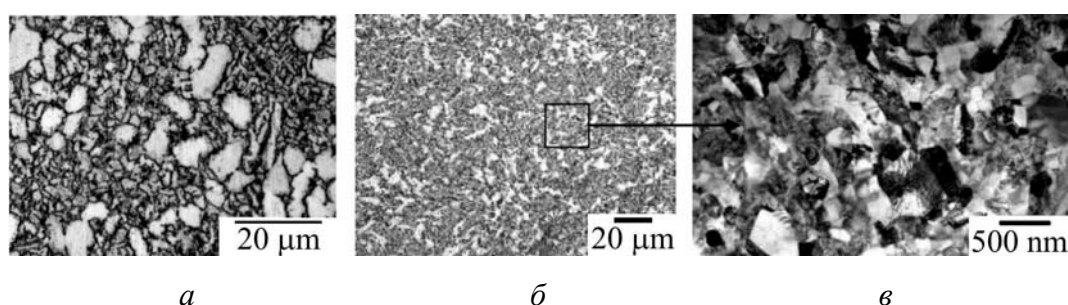


Рис. 3. Микроструктура исходной (а) и УМЗ-заготовки (б, в) из сплава ВТ6 после ИПД-обработки; а, б – оптическая микроскопия; в – ПЭМ

Структура исходной заготовки представляет собой типичную для горячекатаных прутков смешанную глобулярно-пластинчатую структуру, которая состоит из первичных глобулей с размером α -фазы $15 \pm 5 \mu\text{m}$ и $(\alpha + \beta)$ -областей с пластинчатой морфологией (рис. 3,а). Объемная доля глобулярной составляющей α -фазы была примерно 65%. Интенсивная пластическая деформация заготовки привела к измельчению структуры сплава: доля УМЗ-структуры со средним размером зерен/субзерен α -фазы $240 \pm 60 \text{ nm}$ составляла около 70% (рис. 3,в). Размер первичных глобулей α -фазы уменьшился до $5 \mu\text{m}$ (рис. 3,б), при этом они состояли из более мелких субзерен. Микроструктура характеризовалась также высокой плотностью дислокаций, повышенными внутренними напряжениями из-за сильных искажений кристаллической решетки, что типично для многих металлов, полученных ИПД [4]. Было также установлено, что зерна β -фазы имеют форму, близкую к зернам α -фазы. Однако объемная доля β -фазы уменьшилась с 13 до 6% за счет ее частичного растворения и распада $\beta \rightarrow \alpha_2 + \beta$, инициированного ИПД [8].

Данная УМЗ-структура была типична как для поперечного, так и продольного сечения заготовки после ИПД, но в продольном сечении наблюдалась заметная вытянутость глобулей α -фазы в соотношении примерно 1:3.

В результате формирования в заготовке УМЗ-структуры прочность сплава увеличилась почти в 1.5 раза до значений $UTS = 1500 \text{ MPa}$ с сохранением существенной пластичности (относительное удлинение более 9%) (таблица, состояния 1 и 3).

Таблица

Механические свойства при комнатной температуре образцов из лопаток, полученных по серийной и опытной технологиям

№ п/п	Состояние	UTS	σ_{02}	δ	σ_{unif}
		MPa		%	
1	Состояние поставки	965 ± 10	900 ± 20	19 ± 1	8.5 ± 0.2
2	Серийная технология (ИЗШ при $T = 910^\circ\text{C}$)	1060 ± 15	1015 ± 15	14 ± 1	5.7 ± 0.1
3	УМЗ-состояние после ИПД	1450 ± 10	1360 ± 40	9 ± 1	1.7 ± 0.3
4	Опытная технология (ИЗШ при $T = 780^\circ\text{C}$)	1220 ± 5	1180 ± 10	16.0 ± 0.3	9.0 ± 0.2

Микроструктура и механические свойства лопатки, полученной изотермической штамповкой из УМЗ-сплава

Микроструктура штамповок из УМЗ-сплава ВТ6 представлена на рис. 4. Исследование структуры по высоте лопатки на оптическом микроскопе показало, что после ИЗШ микроструктура замка и пера сохранила УМЗ-структуру. На оптических изображениях микроструктуры наблюдались частицы первичной α -фазы и области с сильно измельченной структурой, в которой размер отдельных структурных элементов практически не просматривался (рис. 4,а). При большем увеличении при наблюдении методом РЭМ видно (рис. 4,б), что микроструктура весьма однородна, а размеры α -фазы в большинстве случаев менее 1–2 μm , т.е. глобулы α -фазы уменьшились вследствие разбиения на отдельные зерна.

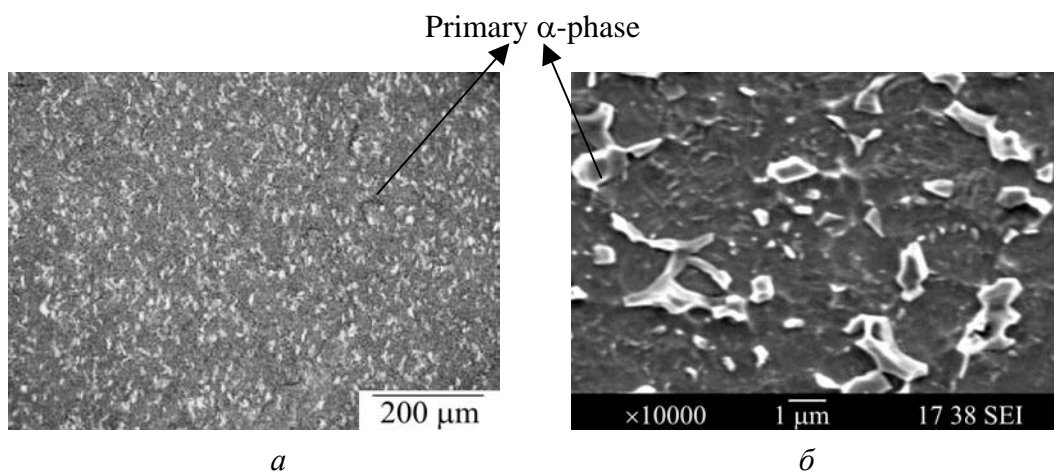


Рис. 4. Микроструктура лопатки, полученной ИЗШ при 780°C из заготовки сплава с УМЗ-структурой: *а* – оптическая металлография, *б* – РЭМ

На рис. 5,а,б представлена тонкая структура лопаток, полученных ИЗШ соответственно по серийной технологии ($T = 920^\circ\text{C}$) из крупнозернистого сплава и по опытной технологии ($T = 780^\circ\text{C}$) из УМЗ-заготовки. В первом случае структура штамповки имеет типичную бимодальную микроструктуру, состоящую из первичных глобул α -фазы размером от 3 до 10 μm в β -превращенной матрице в виде тонких пластин α -фазы со средней толщиной от 1.2 до 1.8 μm . По данным рентгеноструктурного анализа объемная доля β -фазы в состоянии поставки и после объемной штамповки примерно одинакова и составляет ~ 13%.

Микроструктура опытной лопатки характеризуется наличием УМЗ-зерен α -фазы преимущественно равноосной формы, средний размер которых составляет 0.8–0.9 μm (рис. 5,б), т.е. несколько больше, чем в заготовке до ИЗШ. При этом штамповка привела к росту объемной доли β -фазы по сравнению с ИПД-состоянием с 6 до 11% и, следовательно, к увеличению равновесия в фазовом составе сплава.

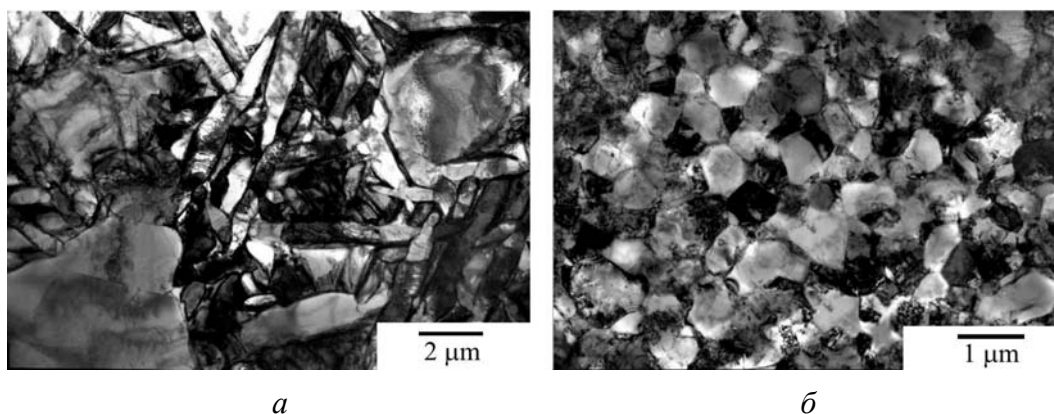


Рис. 5. Тонкая структура лопатки, полученной ИЗШ: *a* – из заготовки в состоянии поставки при $T = 920^{\circ}\text{C}$, *б* – из УМЗ-сплава при $T = 780^{\circ}\text{C}$ (ПЭМ)

Важно отметить, что УМЗ-сплав в полученной лопатке является достаточно термостабильным – проведение отжига вплоть до температуры 650°C , 1 h не привел к заметному изменению микроструктуры и фазового состава.

Механические свойства образцов, вырезанных из замка и пера лопаток, представлены в таблице.

Из таблицы видно, что в состоянии поставки сплав демонстрирует невысокую прочность ($UTS \sim 965$ МПа) и хорошую пластичность ($\delta = 19\%$). Последующая изотермическая деформация штамповкой при 920°C привела к некоторому упрочнению (до 1060 МПа) сплава за счет небольшого измельчения структуры в результате фазовых превращений и динамической рекристаллизации. При этом упрочнение сплава сопровождалось некоторым уменьшением относительного δ и равномерного δ_{unif} удлинения образца до 14 и 5.7% соответственно, что обусловлено формированием пластинчатой морфологии α -фазы в условиях деформации при температуре ниже температуры $T_{p.tr}$ примерно на 40°C (состояния 1 и 2).

УМЗ-сплав ВТ6 (состояние 3 в таблице) демонстрирует очень высокую прочность (1450 МПа) и удлинение (около 9%). После изотермической штамповки УМЗ-заготовок в образцах наблюдается уменьшение прочности до 1220 МПа (состояние 4), но при этом заметно возрастает пластичность, в частности равномерное и относительное удлинение до 9 и 16% соответственно. Судя по приведенным выше данным структурных исследований, это связано со структурными изменениями, происходящими в результате изотермической штамповки при температуре 780°C . На ПЭМ-изображениях микроструктуры штамповок видно, что зеренно-субзеренная структура, сформированная после ИПД-обработки, трансформировалась в равноосную зеренную, о чем свидетельствует более четкий контраст границ (ср. рис. 3,в и 5,б). Размер зерен α -фазы несколько увеличился с 0.3 до 0.8 μm в результате процессов возврата и рекристаллизации при объемной штамповке. Как известно, морфология зерен и структура границ могут оказывать значительное влияние на механическое поведение УМЗ-металлов. Например, ранее в наших исследованиях было показано, что удлиненная фрагмен-

тированная УМЗ-структура технически чистого титана после комбинированной ИПД-обработки трансформируется в равноосную с сохранением ультрамелкого зерна в процессе дополнительной теплой деформации осадкой при 450°C, т.е. в условиях, близких к сверхпластической деформации [9]. В результате такой обработки заметно увеличилась пластичность, в частности относительное и равномерное удлинение, при сохранении высокой прочности при комнатной температуре. Такое механическое поведение УМЗ-титана было обусловлено прежде всего изменением структуры границ зерен, а также увеличением доли большеугловых границ до 80%, которые, как известно, способствуют зернограничному проскальзыванию ультрамелких зерен при пластической деформации. Похожая ситуация, по-видимому, наблюдается в УМЗ-сплаве ВТ6, в котором после ИЗШ наблюдали зерненную структуру с низкой плотностью решеточных дислокаций и тонкими равновесными границами при сохранении малого размера зерна α -фазы (рис. 5,б). Понижение прочности в УМЗ-сплаве после данной обработки можно объяснить некоторым увеличением (с 0.3 до 0.8 μm) размеров зерен в процессе изотермической штамповки при 780°C в результате динамической рекристаллизации. Увеличение объемной доли β -фазы в структуре до 11%, очевидно, также дает дополнительный вклад в повышение пластичности сплава.

Известно, что сочетание высокой прочности и повышенной пластичности в УМЗ-металлах позволяет увеличить сопротивление усталости [5]. В частности, такой подход был описан для УМЗ Тi и сплава Тi-6Al-4V в ряде недавних публикаций [9,10]. В настоящей работе усталостные испытания проводили на натуральных образцах, вырезанных из лопаток (рис. 6) на специальном вибростенде ВЭДС-400А при комнатной температуре, на базе $2 \cdot 10^7$ циклов с частотой $f = 500 \text{ Hz}$ в соответствии с ОСТ 100303-79. По результатам испытаний было установлено, что тип микроструктуры лопаток оказывает значительное влияние на усталостную прочность (рис. 7). Если предел выносливости

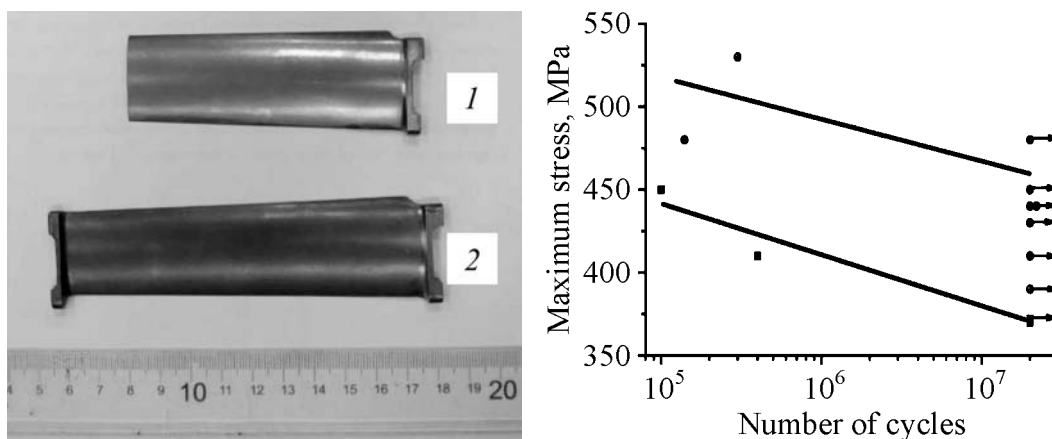


Рис. 6. Вид опытной лопатки компрессора низкого давления, полученной из УМЗ-сплава ВТ6 (1), и образца для усталостных испытаний (2)

Рис. 7. Зависимость усталостной прочности лопатки от вида технологии: ■ – серийная, ● – опытная

серийных лопаток со смешанной глобулярно-пластинчатой структурой составлял 370 МПа, то лопатки с УМЗ-структурой продемонстрировали предел выносливости около 470 МПа, т.е. почти на 30% выше.

Таким образом, полученные результаты демонстрируют принципиальную возможность сохранения УМЗ-состояния и, как следствие, повышения механических свойств в изделиях сложной формы, полученных с использованием ИЗШ при пониженной температуре заготовки, предварительно подвергнутой ИПД. На примере лопатки компрессора ГТД из сплава ВТ6 показано, что достижение повышенной прочности и пластичности за счет формирования в ней стабильной УМЗ-структуры позволило увеличить предел выносливости на 30%. Такое повышение усталостных свойств лопатки компрессора из УМЗ-сплава ВТ6 дает основания прогнозировать качественно новый уровень эксплуатационных характеристик изделий, полученных штамповкой сплавов после ИПД.

Выводы

1. Показана возможность сохранения однородной УМЗ-структуры в лопатке компрессора ГТД из сплава ВТ6, полученной объемной штамповкой при пониженных температурах заготовки, предварительно подвергнутой ИПД.

2. Установлено, что формирование в лопатке равноосной УМЗ-структуры (средний размер зерен α -фазы 0.8 μm) приводит к более высокой прочности и пластичности ($UTS = 1220$ МПа и $\delta = 16\%$) по сравнению со смешанной глобулярно-пластинчатой структурой (размер первичных глобулей до 10 μm) в лопатках, полученных по серийной технологии ($UTS = 1060$ МПа и $\delta = 14\%$).

3. Показано, что повышение прочности и пластичности материала лопаток ГТД обеспечивает повышение предела выносливости на 30% на базе 2–10 циклов.

1. Л.Б. Гецов, *Материалы и прочность деталей газовых турбин*, Машиностроение, Ленинград (1973).
2. Р.З. Валиев, И.В. Александров, *Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства*, ИКЦ «Академкнига», Москва (2007).
3. Р.А. Андриевский, *Наноструктурные материалы: учебное пособие для вузов*, Р.А. Андриевский, А.В. Рагуля (ред.), Академия, Москва (2005).
4. С.П. Малышева, Г.А. Салищев, Р.М. Галеев, В.Н. Даниленко, М.М. Мышляев, А.А. Попов, *ФММ* **95**, № 4, 98 (2003).
5. А.Ю. Виноградов, С. Хасимото, *Металлы* № 1, 51 (2004).
6. I.P. Semenova, L.R. Saitova, G.I. Raab, R.Z. Valiev, *Mater. Sci. Eng.* **A387–389**, 805 (2004).
7. А.В. Боткин, А.Ф. Шаяхметов, И.П. Семенова, Г.И. Рааб, Р.З. Валиев, С.П. Павличич, *Кузнечно-штамповочное производство* № 11, 43 (2008).

8. И.П. Семенова, Л.Р. Саитова, Р.К. Исламгалиев, Т.В. Доценко, А.Р. Кильмаматов, С.Л. Демаков, Р.З. Валиев, ФММ **100**, № 1, 1 (2005).
9. I.P. Semenova, R.Z. Valiev, E.B. Yakushina, G.H. Salimgareeva, T.C. Lowe, J Mater Sci, DOI 10.1007/s, 10853-008-2984-4 ISSN 0022-2461 (Print) 1573-4803 (on-line).
10. I.P. Semenova, E.B. Yakushina, V.V. Nurgaleeva, R.Z. Valiev, International Joint Materials Research (formerly Z. Metallk.) **100**, 1691 (2009).

И.П. Семенова, В.В. Полякова, Р.Р. Валиев, Г.И. Рааб, Н.Ф. Измайлова

МІКРОСТРУКТУРА Й ВЛАСТИВОСТІ ЛОПАТОК КОМПРЕСОРА ГТД, ОТРИМАНИХ ОБ'ЄМНИМ ШТАМПУВАННЯМ З УЛЬТРАДРІБНОЗЕРНИСТОГО СПЛАВУ ВТ6

Представлено результати досліджень механічних властивостей і мікроструктури лопаток газотурбінного двигуна (ГТД) із сплаву ВТ6, виготовлених об'ємним ізотермічним штампуванням (ІЗШ) із заготовки з ультрадрібнозернистою (УДЗ) структурою, отриманою методами інтенсивної пластичної деформації (ІПД). Показано принципову можливість формоутворення лопатки з УДЗ-заготовки об'ємним штампуванням у разі знижених температур і, як наслідок, досягнення підвищених значень міцності й опору втомі за рахунок формування в штампуванні однорідної структури з розміром зерен менше 1 μm у порівнянні з лопатками, отриманими за серійною технологією.

Ключові слова: титановий сплав ВТ6, ультрадрібнозерниста структура, інтенсивна пластична деформація, лопатка компресора низького тиску, об'ємне штампування

I.P. Semenova, V.V. Polyakova, R.R. Valiev, G.I. Raab, N.F. Izmailova

MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES OF BLADES OF GTE COMPRESSOR PRODUCED BY DIE FORGING OF ULTRA-FINE GRAINED BT6 ALLOY

The results of the studies of mechanical properties and microstructure of gas turbine engine (GTE) blades made of BT6 alloy by isothermal die forging (IDF) of a billet with ultra-fine grained (UFG) structure obtained with using severe plastic deformation (SPD). An opportunity of blade formation from an UFG billet by die forging at reduced temperatures is presented and, as a consequence, higher values of strength and fatigue strength can be achieved due to formation of homogeneous structure with grain size less than 1 μm compared to the blades obtained by commercial technology.

Keywords: BT6 titanium alloy, ultra-fine grained structure, severe plastic deformation, low-pressure compressor blade, forging

Fig. 1. Configuration of billets after SPD processing

Fig. 2. Scheme of sample cutoff from the blade made of the UFG BT6 alloy

Fig. 3. Microstructure of the initial (a) and UFG billet (b, v) made of BT6 alloy after SPD processing; a, b – optical microscopy; v – transmission electron microscopy (TEM)

Fig. 4. Microstructure of the blade obtained by IDF at 780°C from the billet made of the alloy with UFG structure: *a* – optical metallography, *b* – scanning electron microscopy (SEM)

Fig. 5. Fine structure of the blade obtained by IDF: *a* – from the billet in the state of delivery at $T = 920^\circ\text{C}$, *b* – from the UFG alloy at $T = 780^\circ\text{C}$ (TEM)

Fig. 6. Appearance of experimental low-pressure compressor made of UFG BT6 alloy (1) and the sample for fatigue tests (2)

Fig. 7. Fatigue strength of the blade related to the type of technology ■ – commercial, ● – experimental technology