

PACS: 61.66.Dk, 62.20.-x

И.П. Семенова<sup>1</sup>, В.В. Полякова<sup>1</sup>, Р.Р. Валиев<sup>1</sup>, Г.И. Рааб<sup>1</sup>,  
Н.Ф. Измайлова<sup>2</sup>

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

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

<sup>2</sup>ОАО «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  $\mu\text{m}$  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%; O<sub>2</sub> – 0.17%; N<sub>2</sub> – 0.01%; H<sub>2</sub> – 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  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$ . 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).

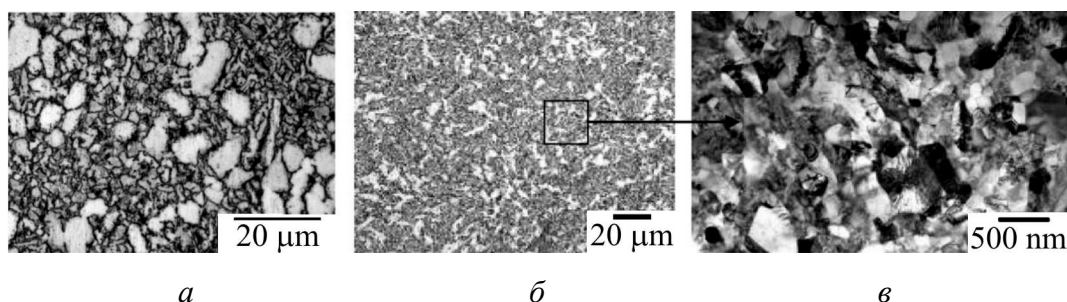


Рис. 3. Микроструктура исходной (а) и УМЗ-заготовки (б, в) из сплава ВТ6 после ИПД-обработки; а, б – оптическая микроскопия; в – ПЭМ

Структура исходной заготовки представляет собой типичную для горячекатаных прутков смешанную глобулярно-пластинчатую структуру, которая состоит из первичных глобулей с размером  $\alpha$ -фазы  $15 \pm 5 \mu\text{m}$  и  $(\alpha + \beta)$ -областей с пластинчатой морфологией (рис. 3,а). Объемная доля глобулярной составляющей  $\alpha$ -фазы была примерно 65%. Интенсивная пластическая деформация заготовки привела к измельчению структуры сплава: доля УМЗ-структуры со средним размером зерен/субзерен  $\alpha$ -фазы  $240 \pm 60 \text{ nm}$  составляла около 70% (рис. 3,в). Размер первичных глобулей  $\alpha$ -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  $\beta$ -фазы имеют форму, близкую к зернам  $\alpha$ -фазы. Однако объемная доля  $\beta$ -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  $\alpha$ -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).

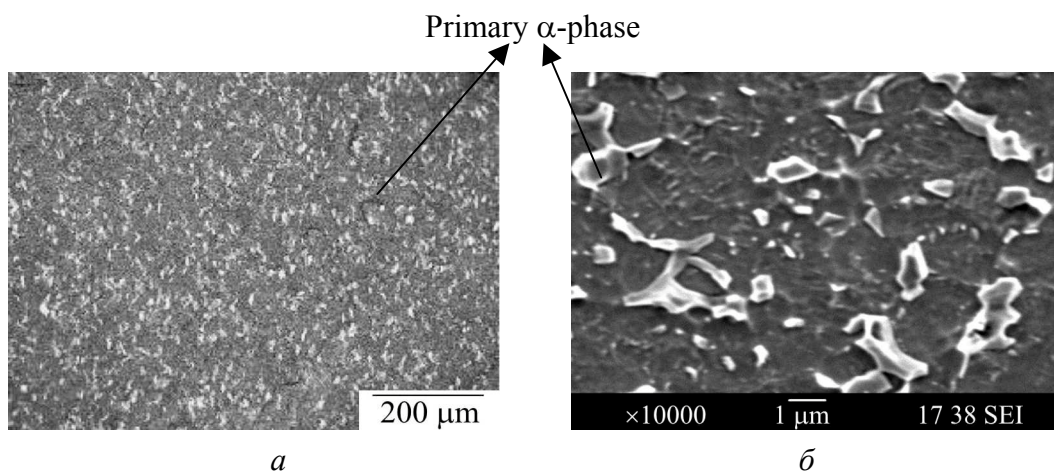
Таблица

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

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

**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  $\alpha$ -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  $\alpha$ -фазы в большинстве случаев менее 1–2  $\mu\text{m}$ , т.е. глобулы  $\alpha$ -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  $\alpha$ -фазы размером от 3 до 10  $\mu\text{m}$  в  $\beta$ -превращенной матрице в виде тонких пластин  $\alpha$ -фазы со средней толщиной от 1.2 до 1.8  $\mu\text{m}$ . По данным рентгеноструктурного анализа объемная доля  $\beta$ -фазы в состоянии поставки и после объемной штамповки примерно одинакова и составляет  $\sim 13\%$ .

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



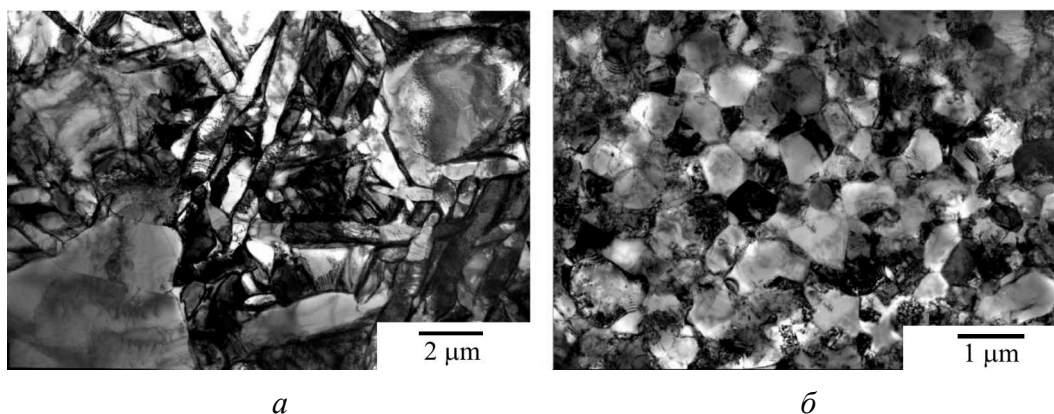


Рис. 5. Тонкая структура лопатки, полученной ИЗШ: *a* – из заготовки в состоянии поставки при  $T = 920^{\circ}\text{C}$ , *б* – из УМЗ-сплава при  $T = 780^{\circ}\text{C}$  (ПЭМ)

Важно отметить, что УМЗ-сплав в полученной лопатке является достаточно термостабильным – проведение отжига вплоть до температуры  $650^{\circ}\text{C}$ , 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 ( $UTS \sim 965 \text{ MPa}$ ) и хорошую пластичность ( $\delta = 19\%$ ). Последующая изотермическая деформация штамповкой при  $920^{\circ}\text{C}$  привела к некоторому упрочнению (до  $1060 \text{ MPa}$ ) сплава за счет небольшого измельчения структуры в результате фазовых превращений и динамической рекристаллизации. При этом упрочнение сплава сопровождалось некоторым уменьшением относительного  $\delta$  и равномерного  $\delta_{\text{unif}}$  удлинения образца до 14 и 5.7% соответственно, что обусловлено формированием пластинчатой морфологии  $\alpha$ -фазы в условиях деформации при температуре ниже температуры  $T_{p.tr}$  примерно на  $40^{\circ}\text{C}$  (состояния 1 и 2).

УМЗ-сплав ВТ6 (состояние 3 в таблице) демонстрирует очень высокую прочность ( $1450 \text{ MPa}$ ) и удлинение (около 9%). После изотермической штамповки УМЗ-заготовок в образцах наблюдается уменьшение прочности до  $1220 \text{ MPa}$  (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  $780^{\circ}\text{C}$ . 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,б и 5,б). Размер зерен  $\alpha$ -фазы несколько увеличился с  $0.3$  до  $0.8 \mu\text{m}$  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 зерненую структуру с низкой плотностью решеточных дислокаций и тонкими равновесными границами при сохранении малого размера зерна  $\alpha$ -фазы (рис. 5,б). Понижение прочности в УМЗ-сплаве после данной обработки можно объяснить некоторым увеличением (с 0.3 до 0.8  $\mu\text{m}$ ) размеров зерен в процессе изотермической штамповки при 780°C в результате динамической рекристаллизации. Увеличение объемной доли  $\beta$ -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 Ti и сплава Ti-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

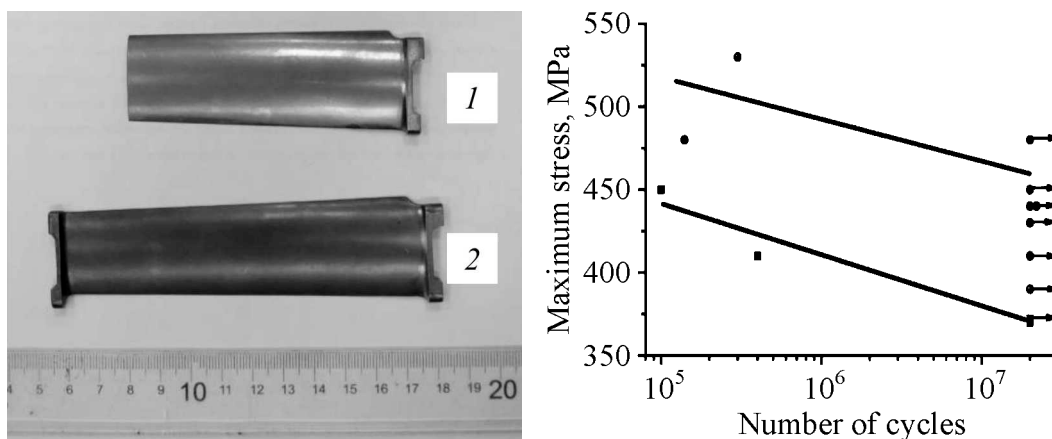


Рис. 6. Вид опытной лопатки компрессора низкого давления, полученной из УМЗ-сплава ВТ6 (1), и образца для усталостных испытаний (2)

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  $\alpha$ -фазы 0.8  $\mu\text{m}$ ) 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  $\mu\text{m}$ ) 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. Кильмаметов, 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  $\mu\text{m}$  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  $\mu\text{m}$  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