

УДК 669

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ ПОЛУЧЕНИЯ ШТАМПОВОК ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ГТД

<sup>1</sup>Кандаров И.В., <sup>2</sup>Салищев Г.А., <sup>3</sup>Панкратов Д.Л., <sup>1</sup>Латыш В.В.,

<sup>2</sup>Жеребцов С.В., <sup>4</sup>Измайлова Н.Ф., <sup>5</sup>Половников В.М.

<sup>1</sup>Научно-производственная ассоциация «Технопарк авиационных технологий»,  
Уфа, e-mail: [tehnopark-at@yandex.ru](mailto:tehnopark-at@yandex.ru);

<sup>2</sup>Белгородский государственный университет, Белгород;

<sup>3</sup>Набережночелнинский филиал, Казанский федеральный университет, Набережные Челны;

<sup>4</sup>Публичное акционерное общество «Уфимское моторостроительное  
производственное объединение», Уфа;

<sup>5</sup>Открытое акционерное общество «Инновационный научно-технический центр «Искра»», Уфа

В данной работе представлены результаты опытного применения метода интенсивной пластической деформации (ИПД) в промышленном технологическом процессе получения штамповок лопаток из сплава ВТ6. В качестве метода ИПД использовался метод теплой всесторонней изотермической деформации в сочетании с кузнечной протяжкой. Данный метод применялся на стадии подготовки материала перед основными формообразующими операциями. Для качественного и количественного сравнения результатов применения предлагаемого метода были исследованы структура и механические свойства штамповок лопаток, изготовленных из ультрамелкозернистого сплава ВТ6 с размером зерен 0,3–0,5 мкм. Формообразование штамповок лопаток производилось в два этапа: на первом этапе электрической высадкой формировали заготовку под штамповку и затем, методом изотермической штамповки, изготавливали саму лопатку. Были изучены следующие основные характеристики: прочность, пластичность, ударная вязкость с концентраторами типа RCU и KCT и сопротивление многоциклового усталости. Полученные данные сравнивались со свойствами лопаток, изготовленных по серийной технологии.

**Ключевые слова:** интенсивная пластическая деформация, ультрамелкозернистая структура, штамповка, механические свойства

## INVESTIGATION OF THE EFFICIENCY OF SEVERE PLASTIC DEFORMATION IN THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF FORGING TURBINE ENGINE COMPRESSOR BLADES

<sup>1</sup>Kandarov I.V., <sup>2</sup>Salischev G.A., <sup>3</sup>Pankratov D.L., <sup>1</sup>Latysh V.V.,

<sup>2</sup>Zherebtsov S.V., <sup>4</sup>Izmaylova N.F., <sup>5</sup>Polovnikov V.M.

<sup>1</sup>Research and Production Association «Technopark AT», Ufa, e-mail: [tehnopark-at@yandex.ru](mailto:tehnopark-at@yandex.ru);

<sup>2</sup>Belgorod State University, Belgorod;

<sup>3</sup>Naberezhnye Chelny branch, Kazan Federal University, Naberezhnye Chelny;

<sup>4</sup>Public Joint Stock Company «UMPO», Ufa;

<sup>5</sup>Open Joint Stock Company Innovative Scientific and Technological Center «Iskra», Ufa

There are presented the results of experimental application of the method of severe plastic deformation (SPD) in the technological process of manufacturing stamped blades from VT6 alloy. As a method of SPD was used warm multiple isothermal deformation in combination with forging. This method was used for structure refining, before the main form-building operations. For the qualitative and quantitative comparison of the results of applying the proposed method was investigated the structure and mechanical properties of blades from ultrafine-grained (UFG) VT6 alloy with a grain size of 0,3–0,5 microns. Forming of blades was made in two phases: the first phase of the electric landing formed blank for stamping and, then, by isothermal forging, produced the very blade. Strength, ductility, toughness with different types of concentrator and fatigue resistance, are studied, as well as the effect on these parameters of surface modification with nitrogen ions: the following main characteristics were studied. The obtained data were compared with the properties of the blades, manufactured by serial technology.

**Keywords:** severe plastic deformation, ultrafine structure, stamping, mechanical properties

В настоящее время в России реализуется ряд правительственных программ по созданию и освоению серийного производства перспективных самолетов и газотурбинных двигателей (ГТД) для авиации

и наземных энергетических установок. Для успешной реализации программ необходимо обеспечить серийный выпуск ГТД, конкурентоспособных на внутреннем и внешнем рынках.

Одним из перспективных путей решения данной задачи является использование ультрамелкозернистых (УМЗ) и наноструктурных материалов [1–2]. В практической реализации наиболее эффективным направлением для получения рекордных эксплуатационных свойств деталей является путь, сочетающий методы деформационного измельчения микроструктуры с методами формообразования.

В работе объектом исследования была выбрана опытная технология получения лопаток ГТД из титанового сплава ВТ6, отличающаяся от серийной технологии использованием УМЗ сплава ВТ6 с размером зерен около 0,5 мкм.

Таким образом, цель настоящей работы заключалась в исследовании структуры и механических свойств поковок лопаток, изготовленных из УМЗ сплава ВТ6 и влияния дополнительной деформационно-термической обработки, введенной в серийную технологию.

### Материалы и методы исследования

В качестве материала исследования использовали  $(a + b)$ -титановый сплав ВТ6 со средним размером  $b$ -зерен 230 мкм. В области предполагаемых температур тепловой деформации сплав ВТ6 содержит 15–25%  $b$ -фазы.

Заготовки необходимых геометрических размеров (согласно конструкторской документации серийной технологии) с УМЗ структурой (рис. 1, б) получали методом многократной всесторонней деформации в изотермических условиях [3] в интервале температур от 700°C на первых этапах до 500°C в конце, на гидравлическом прессе ДБ-2434 силой 2500 кН, оснащенным изотермическим штамповым блоком [3]. Степень деформации при осадке не превышала 50%.

Штамповки лопаток из полученных УМЗ заготовок были изготовлены в два этапа. На первом этапе высадкой набирали материал для последующего формообразования замковой части пера лопатки. Для процесса высадки использовали установку, в которой реализован контактный местный нагрев зоны деформирования.



Рис. 1. Внешний вид образцов сплава ВТ6 после многократной всесторонней деформации в изотермических условиях

Затем методом изотермической штамповки проводили основную формообразующую операцию при температуре 700°C. Общая накопленная степень деформации – 88%. Готовые штамповки термообработывали по режиму: нагрев и выдержка при 550°C в течение 120–150 мин с последующим охлаждением на воздухе.

Механические свойства материала после электровысадки оценивались по испытаниям на растяжение и ударную вязкость. Образцы на растяжение имели размеры рабочей области  $\varnothing 5 \times 55$  мм [2].

Трещиностойкость сплава с УМЗ структурой оценивалась по результатам испытаний на ударную вязкость образцов с предварительно введенной установочной трещиной (КСТ). Образцы были изготовлены в соответствии с ГОСТ 9454-78, размер образцов составлял  $6 \times 8 \times 55$  мм.

Все полученные данные сравнивались с результатами, полученными на сплаве ВТ6, обработанном по серийной технологии, отличающейся тем, что изотермическую штамповку выполняют при  $T \approx 920$ °C.

Усталостные испытания на базе  $2 \cdot 10^7$  циклов проводились при комнатной температуре на электродинамическом вибростенде ВЭДС-900 по первой изгибной форме колебаний.

Структурные исследования проводили методом оптической микроскопии (ОМ), просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ).

### Результаты исследования и их обсуждение

Микроструктура сплава ВТ6 в УМЗ состоянии, полученном всесторонней изотермической деформацией, характеризуется равномерной микро- и макроструктурой со средним размером зерен 0,3–0,5 мкм (рис. 2).

На макроструктуре заготовки после электровысадки не обнаружено дефектов деформационного характера и перегрева материала в зоне обработки (рис. 3, а). Микроструктура исходного материала (зона стержня, рис. 3, б и 2) представляет собой мелкодисперсную смесь  $\alpha$  и  $\beta$  фаз. Однако исследование микроструктуры свидетельствует об огрублении структуры по мере приближения к зоне нагрева и деформации при электровысадке. В начале переходной зоны (рис. 3, в) структура огрубляется, размер частиц  $\alpha$ -фазы в отдельных случаях достигает  $\sim 5$  мкм. В переходной зоне микроструктура представлена глобулярными  $\alpha$ -частицами размерами менее 10 мкм и пластинчатой  $\alpha/\beta$  структурой (рис. 3, г). В зоне электрической высадки наблюдается структура корзиночного плетения с включениями частиц  $\alpha$ -фазы размером около 5 мкм (рис. 3, д). Значительный нагрев УМЗ материала, очевидно, приводит к общему огрублению структуры и частичной утрате тех преимуществ, которое может дать уменьшение размера зерен до УМЗ интервала.

Поэтому на стадии формирования заготовки под штамповку было бы предпочтительно использование значительно более низких температур для сохранения структуры и свойств материала в переходной области, в которой при консоль-

ном нагружении будет отмечаться максимальное усилие.

Механические свойства лопаток, изготовленных из сплава с УМЗ структурой, в сравнении со свойствами лопаток, полученных по серийной технологии, представлены в табл. 1.

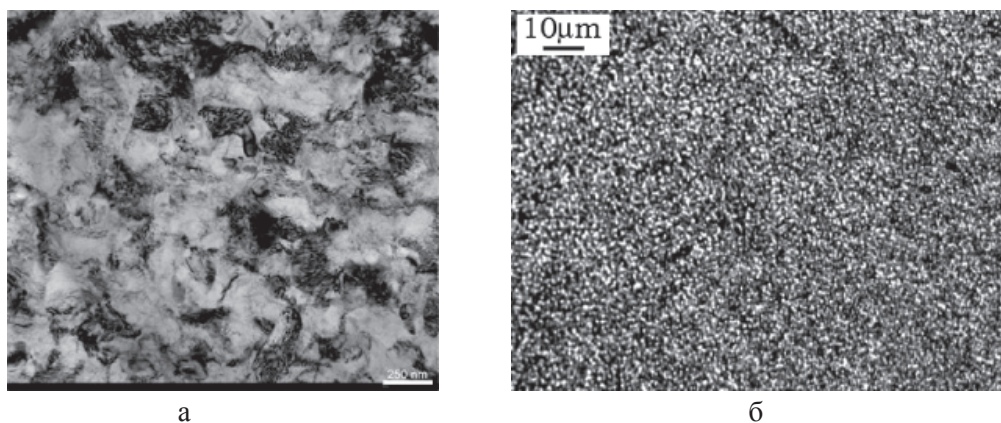


Рис. 2. Микроструктура сплава ВТ6 в УМЗ состоянии:  
а – ТЕМ; б – СЭМ

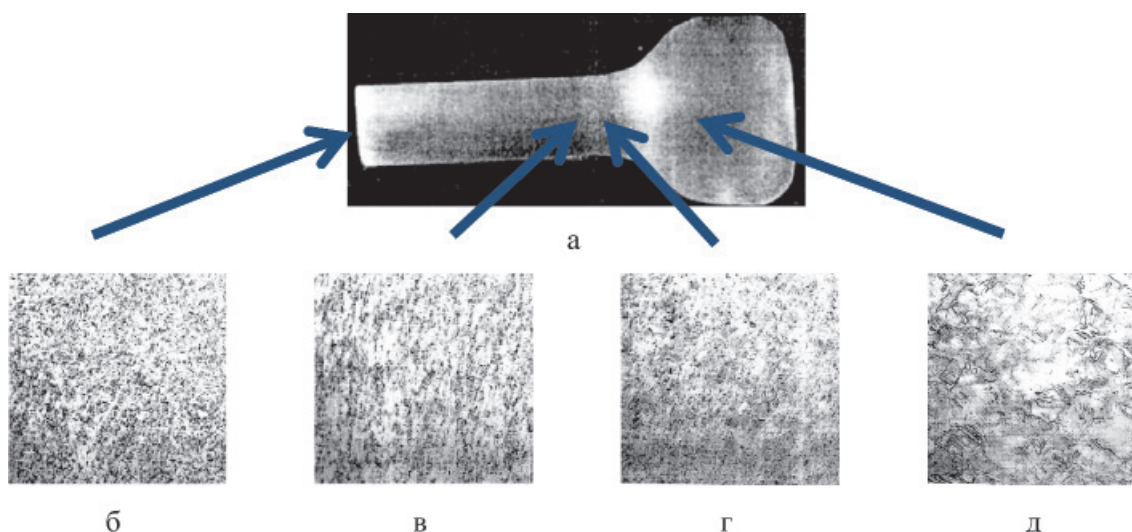


Рис. 3. Макроструктура (а) и микроструктуры (б–д) заготовки УМЗ сплава ВТ6 после электровысадки

Таблица 1

Механические свойства лопаток, изготовленных из сплава ВТ6 с УМЗ структурой в сравнении со свойствами лопаток, полученных по серийной технологии\*

Тип лопатки	Операция	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	КСУ, Дж/см <sup>2</sup>	Твердость $d_{отп}$ , мм
УМЗ	Электровысадка	1130	18,6	52,1	39	3,3
	Штамповка без ТО	1134	15	49,3	48	3,4
	Штамповка после ТО	1160	13,7	43	44	3,4
Серия	Штамповка после ТО	1073	15,75	47,3	68	3,47
Норма по 104.03ТУ42, 117.03ТУ42		950–1200	$\geq 10$	$\geq 30$	$\geq 35$	3,3–3,8

Примечание. \* В таблице приведены средние значения по двум испытаниям, кроме состояния после электровысадки, где данные получены на одном образце для каждого вида испытаний.

Из табл. 1 видно, что прочность заготовок после электровысадки и штамповок лопаток, как до, так и после ТО, на 5–8% выше, чем прочность серийной лопатки.

Характеристики пластичности (относительное сужение и относительное удлинение) немного выше в заготовке, подвергнутой электровысадке, однако в целом разница в пластичности, так же как и твердости, между УМЗ и серийной лопаткой незначительная. Следует отметить заметное снижение ударной вязкости УМЗ лопатки, по сравнению с серийной лопаткой, причем максимальная разница наблюдается для заготовки после электровысадки (43%). В то же время все полученные данные удовлетворяют требованиям 104.03ТУ42 и 117.03ТУ42 (табл. 1). Нужно отметить, что наблюдаемые тенденции в изменении свойств прочности и ударной вязкости согласуются с литературными данными для УМЗ материалов [1, 2, 4, 5]. В то же время абсолютное значение прироста прочности

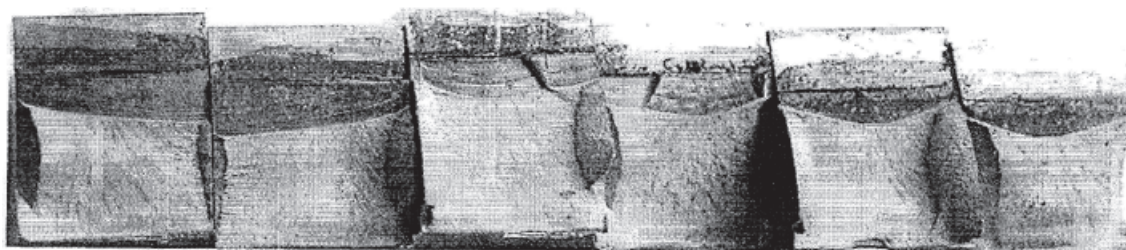
в УМЗ состоянии заметно ниже, чем описано в [4–5], что, очевидно связано с укрупнением структуры в процессе электровысадки и штамповки. Ростом зерен можно объяснить и повышение пластических характеристик до уровня серийных образцов, тогда как типичные значения пластичности высокопрочных УМЗ состояний в сплаве ВТ6 не превышают 10%.

В табл. 2 приведены данные по сопротивлению росту усталостной трещины в УМЗ состоянии и в серийных образцах в исходном состоянии, полученные при выращивании усталостной трещины в «ударных» образцах (КСТ). Скорость роста усталостной трещины рассчитывалась как отношение длины усталостной трещины к соответствующему количеству циклов. Видно, что УМЗ состояние показывает заметно более высокое сопротивление росту усталостной трещины по сравнению с образцами, обработанными по серийной технологии.

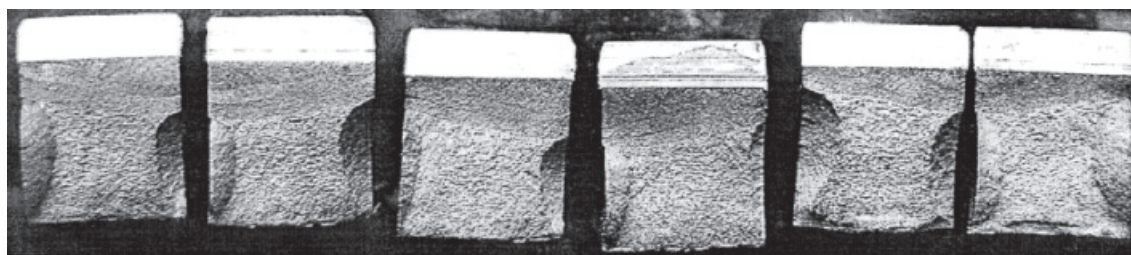
Таблица 2

Скорость зарождения и роста усталостной трещины и КСТ ударная вязкость сплава ВТ6 с УМЗ структурой в сравнении со свойствами лопаток, полученных по серийной технологии

№ п/п	Отношение длины трещины к количеству циклов, мм/цикл ( $\cdot 10^{-4}$ )		Ударная вязкость КСТ, Дж/см <sup>2</sup>	
	УМЗ	серийное	УМЗ	серийное
Средн.	1,7	2,7	23,6	22,0



а



б

Рис. 4. Макроструктура изломов образцов с концентратором вида КСТ после ударного нагружения:

а – УМЗ структура; б – серийная обработка

Следует отметить, что в данном случае общее количество циклов затрачивалось как на рост трещины, так и на предшествующую ей стадию образования трещины. Продолжительность первой стадии увеличивается с уменьшением размера зерен и повышением твердости [5]. Сопротивление росту трещины, наоборот, снижается с измельчением микроструктуры, во-первых, из-за уменьшения зоны пластической деформации в вершине трещины и, во-вторых, из-за менее извилистого пути усталостной трещины [5]. В нашем случае также наблюдается более шероховатая поверхность усталостной трещины в образцах после серийной обработки по сравнению с УМЗ структурой (рис. 4).

Таким образом, наблюдаемое в нашем случае общее увеличение количества циклов, по-видимому, связано с увеличением работы зарождения трещины, тогда как работа распространения трещины изменяется слабо. Последнее утверждение основано на результатах испытаний на ударную вязкость образцов с предварительно нанесённой усталостной трещиной (КСТ). Приведенные в табл. 2 результаты показывают, что КСТ ударная вязкость во всех рассмотренных состояниях примерно одинакова.

По условиям ОСТ 1-90197-89 «Поковки дисков и валов кованые и штампованные из титановых сплавов» ударная вязкость для образцов с концентратором вида КСТ должна быть не менее 15 Дж/см<sup>2</sup>. Как видно из табл. 2, полученные результаты в ~1,5 раза превышают требования ОСТа.

Фактический предел выносливости лопаток второй ступени РКВД изд. 117С с УМЗ структурой находится на уровне  $\sigma_{-1} = 420$  МПа (согласно инструкции 117.01И58  $\sigma_{-1} \geq 400$  МПа,  $N = 2 \cdot 10^7$ , 6 штук без разрушения). Контроль пера лопаток после испытаний методами капиллярной дефектоскопии трещин в профильной части пера лопаток не выявил.

### Заключение

На основе результатов исследований структуры и механических свойств штамповок лопаток, изготовленных из УМЗ титанового сплава ВТ6, и сравнения полученных данных со свойствами лопаток изготовленных по серийной технологии можно сделать следующие выводы.

Благодаря использованию УМЗ сплава ВТ6 температура штамповки может быть

снижена с 920°C (серийная технология) до 700°C. Микроструктура пера лопатки после штамповки при 700°C значительных изменений не претерпевает, что обеспечивает сохранение высокого уровня прочности. Значения ударной вязкости УМЗ лопаток ниже серийных на 35%, но при этом они удовлетворяют требованиям соответствующих ТУ. Значения трещиностойкости серийных и УМЗ лопаток из сплава ВТ6 примерно одинаковые и в 1,5 раза превышают требования ОСТа, при этом лопатки с УМЗ структурой имеют более высокое сопротивление росту трещин.

Таким образом, установлено, что формирование УМЗ структуры в заготовках под изотермическую штамповку позволяет существенно снизить температуру штамповки, при одновременном повышении прочностных и усталостных характеристик конечного изделия и сохранении в допустимых пределах пластичности и трещиностойкости.

### Список литературы

1. Валиев Р.З. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией / Р.З. Валиев, И.В. Александров. – М.: Логос, 2000. – 272 с.
2. Золотаревский В.С. Механические испытания и свойства металлов. – М.: Металлургия, 1974. – 295 с.
3. Салищев Г.А., Галеев Р.М., Жеребцов С.В. и др. Механические свойства титанового сплава ВТ6 с субмикроструктурной структурой // Металлы. – 1999. – № 6. – С. 84–87.
4. Салищев Г.А., Галеев Р.М., Малышева С.П. и др. Формирование субмикроструктурной структуры в титане и титановых сплавах и их механические свойства / Г.А. Салищев, Р.М. Галеев, С.П. Малышева // МитОМ. – 2006. – № 2. – С. 19–26.
5. Meyers M.A., Mishra A., Benson D.J. Mechanical properties of nanocrystalline materials / M.A. Meyers, A. Mishra, D.J. Benson // Progr. Mater. Sci. – 2006. – Vol. 51. – P. 427–556.

### References

1. Valiev R.Z. Nanostrukturnye materialy, poluchennye intensivnoy plasticheskoy deformatsiej / R.Z. Valiev, I.V. Aleksandrov. M.: Logos, 2000. 272 p.
2. Zolotarevskij V.S. Mehanicheskie ispytaniya i svojstva metallov. M.: Metallurgija, 1974. 295 p.
3. Salishhev G.A., Galeev R.M., Zherebcov S.V. i dr. Mehanicheskie svojstva titanovogo splava VT6 s submikrokristallicheskoj strukturoj // Metally. 1999. no. 6. pp. 84–87.
4. Salishhev G.A., Galeev R.M., Malysheva S.P. i dr. Formirovanie submikrokristallicheskoj struktury v titane i titanovyh splavah i ih mehanicheskie svojstva / G.A. Salishhev, R.M. Galeev, S.P. Malysheva // MitOM. 2006. no. 2. pp. 19–26.
5. Meyers M.A., Mishra A., Benson D.J. Mechanical properties of nanocrystalline materials / M.A. Meyers, A. Mishra, D.J. Benson // Progr. Mater. Sci. 2006. Vol. 51. pp. 427–556.