

В. В. Астанин, Ф. Ф. Сафин, И. В. Кандаров, Ю. В. Артюхин, В. М. Половников

## ПРИМЕНЕНИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ АВИАЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В работе представлены результаты практических исследований возможностей изотермической штамповки в режиме низкотемпературной сверхпластичности. Показано, что такая технология позволяет получать из сплава ВТ6 изделия авиационного назначения с регламентированной ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой и повышенными эксплуатационными свойствами. Дальнейшее управление свойствами успешно осуществляется путем термообработки. Для подготовки УМЗ структуры при мелкосерийном производстве вполне пригодны операции осадки с переменной оси приложения нагрузки и последующая кузнечная протяжка на профильных бойках. Исследованы свойства защитно-смазочных покрытий и структура материала после деформации и кратковременного отжига. *Ультрамелкое зерно; ВТ6; лопатки компрессора; стеклосмазки; технология*

Практический интерес к материалам с регламентированной ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой вызван сочетанием высокой прочности при комнатной температуре и низкотемпературной сверхпластичности при повышенных температурах. Это становится особенно важным при обработке труднодеформируемых материалов, в частности, титановых сплавов, где вопросы снижения температуры обработки имеют большое значение, поскольку это связано с окислением и газонасыщением изделий из таких сплавов. Окалинообразование и газонасыщение приводит не только к потере дорогостоящего металла, но и к увеличению трудоемкости обработки. Это особенно заметно при получении тонкостенных изделий, когда их толщина соизмерима с толщиной газонасыщенного слоя. Здесь существенный прогресс может быть обеспечен путем снижения температуры обработки, в частности, за счет применения низкотемпературной сверхпластичности титановых сплавов с УМЗ структурой [1]. На этом эффекте

основан такой способ обработки заготовок, как изотермическая штамповка. Дополнительный эффект от снижения температуры изотермической штамповки – это возможность применять для изготовления штампов теплостойкие стали вместо дорогостоящих никелевых сплавов.

Для реализации эффекта низкотемпературной сверхпластичности необходимо создать в заготовке однородную УМЗ структуру, что достигается интенсивной пластической деформацией по специальному режиму. Логарифмическая степень накопленной деформации должна быть не менее 5,0, а конечная температура должна соответствовать условиям низкотемпературной сверхпластичности.

### ПОДГОТОВКА СТРУКТУРЫ

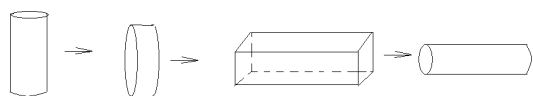
Анализ схем интенсивной пластической деформации показал, что к условиям опытного производства наиболее применима схема осадки с переменной оси приложения нагрузки и последующая кузнечная протяжка на профильных бойках [2]. На этом этапе важно получить необходимую степень накопленной деформации, однородно распределенной по объему заготовки. Необходимое число переходов и степень деформации на каждом из них были определены с помощью компьютерного моделирования операций, схема которых приведена на рис. 1.

Одновременно проверяли устойчивость течения материала в ручьях штамповой оснастки и прогнозируемые значения усилий деформации. Моделирование осуществляли в системе DEFORM-3D. В качестве определяющих соотношений выбраны диаграммы деформации сплава ВТ6 при различных температурах. Значение фактора трения было определено в от-

Контактная информация: 8-917-408-80-13

Работа выполнена в рамках проекта «Создание технологий и промышленного производства узлов и лопаток ГТД с облегченными высокопрочными конструкциями для авиационных двигателей новых поколений» (шифр 2010-218-01-133) в рамках реализации Постановления № 218 Правительства РФ от 9.04.2010 г. «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства». Экспериментальные результаты были получены с использованием оборудования НОЦ «Наноструктурные материалы и высокие технологии» ФГБОУ ВПО УГАТУ

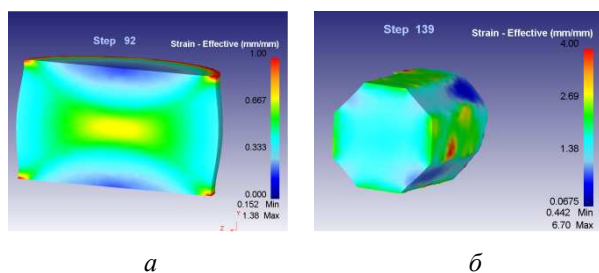
дельном эксперименте и принято равным 0,3. Начальный диаметр  $d = 55$  мм, высота  $h = 61$  мм, скорость  $v = 2,4$  мм/сек.



**Рис. 1.** Схема осадки с переменной осью приложения нагрузки и последующей кузнечной протяжки на профильных бойках

На рис. 2, *а, б* приведены начальный и конечный шаги моделирования первого цикла в разрезе.

В результате осадки материала на плоских бойках во время первого перехода происходит сосредоточение максимальной степени накопленной деформации в средней зоне заготовки, объем которой составляет около 40 %. Последующие шаги приводят к однородной проработке всего объема заготовки. Накопленная степень логарифмической деформации за один цикл достигает 1,4.



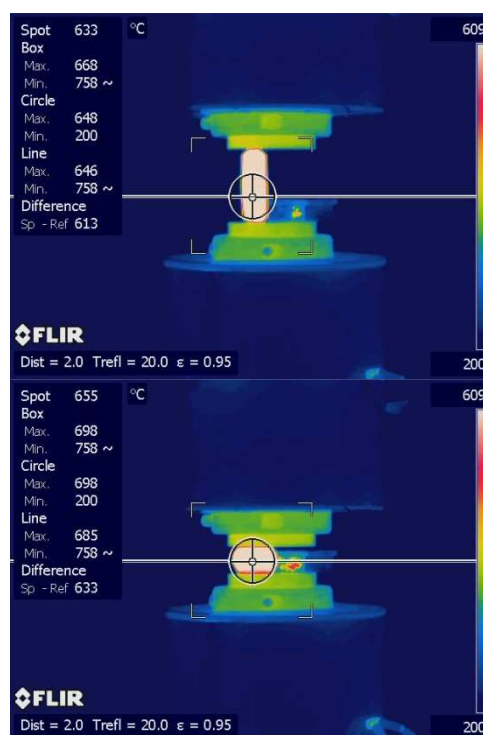
**Рис. 2.** Модели начального (*а*) и конечного (*б*) этапов деформации первого цикла

В результате прохождения трех циклов деформационной обработки степень накопленной деформации увеличивается до 5,7 и заметно выравнивается по объему. Кузнечная протяжка на профильных бойках служит в основном для калибровки прутка и добавляет логарифмическую степень деформации порядка 0,24.

Конечный результат подготовки УМЗ структуры зависит не только от степени накопленной деформации, но и от температуры заготовки [2]. В процессе осадки на заготовку действует одновременно охлаждение окружающим воздухом и деформационный разогрев, зависящий от скорости деформации. Для контроля режима было выполнено термометрирование заготовок с помощью тепловизора FLIR P660. Тепловизор откалиброван на диапазон температур 300...2000 °С, коэффициент черноты определен

как 0,95. Съемка проводилась непосредственно у пресса на расстоянии 2 м от объекта.

Путем термометрирования был подобран оптимальный режим работы пресса. В качестве примера на рис. 3 показаны начальная и конечная стадия осадки цилиндрической заготовки. Здесь в результате деформации температура заготовки увеличивается с 668 до 698 °С, а в конце полного цикла обработки снижается до 590 °С. Подобный режим считается наиболее благоприятным для измельчения зерна [2]. Протяжку выполняли в три перехода со сменой бойков. Температурные и деформационные режимы протяжки в основном повторяли режимы осадки, но конечная температура снижалась до 500...520 °С. Такая температура на завершающей стадии обработки обеспечивает наименьший размер зерна. Появление деформационных дефектов не наблюдалось, что обусловлено небольшой степенью деформации и мягкой схемой напряженного состояния.



**Рис. 3.** Снимок температурных полей на начальной и конечной стадиях осадки цилиндрической заготовки

Внешний вид заготовки  $\varnothing 30$  мм после кузнечной протяжки показан на рис. 4. Каждая заготовка предназначена для изготовления двух лопаток.

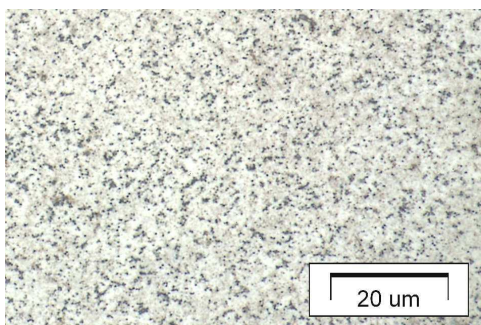
В условиях серийного производства операцию кузнечной протяжки можно заменить более

производительной сортовой прокаткой при условии сохранения отработанного режима. Схемы деформированного состояния прокатки в калибрах и кузнечной протяжки на профильных бойках очень близки.



**Рис. 4.** Внешний вид полученной заготовки

Полученная в результате проведенных операций микроструктура неразличима на макрошлифах, в оптическом микроскопе можно наблюдать мелкодисперсную и однородно распределенную смесь фаз (рис. 5, *а*). Детальный анализ был проведен с помощью просвечивающей электронной микроскопии (рис. 5, *б*).



*а*

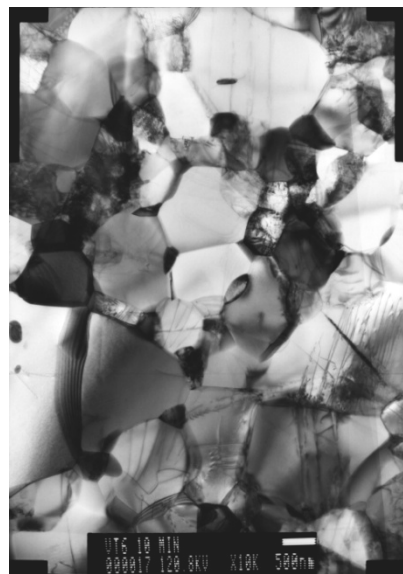


*б*

**Рис. 5.** Структура заготовки послековки и кузнечной протяжки: *а* – оптическая, *б* – электронная микроскопия

Структура состоит из равноосных зерен со средним размером 0,4 мкм. Высокая плотность дислокаций и развитые контуры экстинкции свидетельствуют о высоком уровне остаточных микронапряжений. Образцы для исследования были вырезаны как в продольном, так и в поперечном направлениях заготовки. Их сравнение не показало заметных отличий и не обнаружило вытянутости зерен.

Дальнейшие операции штамповки предполагают нагрев заготовок. Поэтому были исследованы структурные изменения, происходящие в результате нагрева до 680 °С и десятиминутной выдержки. На рис. 6 можно видеть, что большинство зерен очистились от дислокаций и приобрели более правильную форму. Средний размер зерен изменился незначительно: на фоне укрупнения прежних зерен появились мелкие включения вторичной фазы, преимущественно расположенные в тройных стыках. Материал с такой структурой обладает меньшим уровнем остаточных напряжений, но сохраняет способность к низкотемпературной сверхпластичности.



**Рис. 6.** Структура заготовки после десятиминутного отжига при 680 °С

### ЗАЩИТНО-СМАЗОЧНЫЕ ПОКРЫТИЯ

Для получения лопаток в режиме низкотемпературной сверхпластичности были выбраны операции объемной штамповки, требующие применения нетрадиционной технологической смазки.

Согласно проведенному анализу литературы в качестве технологической смазки были выбраны стекломали с температурой размягчения



около 600 °С: Deltaglaze FB-668, а также ЭВТ-26 и ЭВТ-7 производства ФГУП ВИАМ, применяемые в качестве защитного покрытия при термообработке высокопрочных титановых сплавов. Предполагалось использовать одну из них в качестве смазки для штамповки при температурах 650...750 °С.

Испытания стеклэмалей проводили методом осадки кольцевых образцов с типичными размерами  $h:d:D = 6:9:18$  [3]. Внешний вид испытанных образцов показан на рис. 7, а результаты испытаний приведены в табл. 1.



Рис. 7. Внешний вид кольцевых образцов, испытанных при различных температурах

Таблица 1  
Результаты испытаний разных видов смазки

Марка	$t, ^\circ\text{C}$	$m$ (коэффициент трения)
ЭВТ 26	650	0,2
	700	0,07
	750	0,05
FB-668	650	0,09
	700	0,06
	750	0,04
ЭВТ-7	650	0,05
	700	0,04
	750	0,035

Как видно из приведенных данных, существенных различий по коэффициентам трения между смазками нет, но в условиях штамповки приобретают значение другие факторы, такие как укрывистость, растекаемость, сцепление с поверхностью. Учитывая все факторы, предпочтение был отдано эмали ЭВТ-7.

### ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПОЛУЧЕННЫХ ЗАГОТОВОК

С целью прогнозирования поведения сплава ВТ6 в условиях изотермической штамповки были проанализированы диаграммы деформации кольцевых образцов, покрытых эмалью ЭВТ-7 и испытанных на осадку (рис. 8). Испытания проводили при температурах 650, 700 и 750 °С.

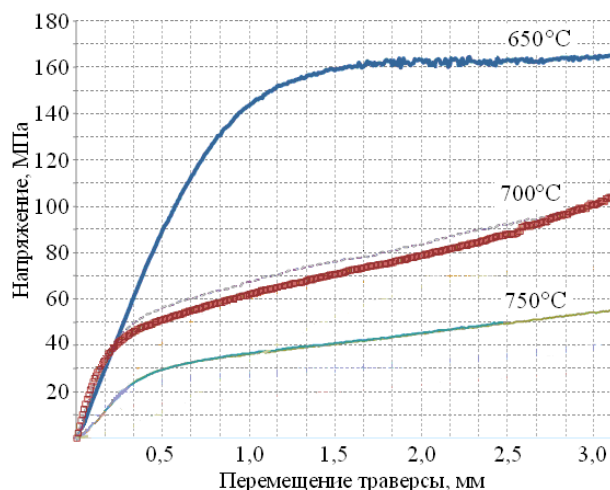


Рис. 8. Диаграммы деформации кольцевых образцов, покрытых эмалью ЭВТ-7 и испытанных на осадку

Совместный анализ диаграмм и формы осажженных образцов показывает, что деформируемость УМЗ материала хорошо сочетается со свойствами смазки при всех выбранных температурах, однако напряжения деформации при 650 °С представляются слишком высокими для сохранения длительной работоспособности штамповой оснастки. Наиболее приемлемой, как с точки зрения сохранения УМЗ структуры, так и по реологическим характеристикам представляется температура 700 °С.

Требования к эксплуатационным свойствам могут оказаться противоречивыми. Так, рекордное повышение прочности путем уменьшения размера зерен в сплаве ВТ6 сопровождается снижением характеристик ударной вязкости и сопротивления ползучести [4]. Все это приводит к необходимости оптимизации УМЗ структуры и свойств (табл. 2) полученных изделий.

Таблица 2  
Механические свойства сплава ВТ6

$\sigma_b, \text{МПа}$	$\delta, \%$	$\psi, \%$	КСУ, МДж/м <sup>2</sup>	$\tau, \text{час}$ 300°С
Нормы по ОСТ 90006-86				
950–1150	≥ 10	≥ 30	≥ 0,35	≥ 100 <sup>1</sup>
Послековки и кузнечной протяжки <sup>2</sup>				
1200	7,5	57,5	0,39	> 460 <sup>3</sup>
После термообработки <sup>4</sup>				
1319	9,3	52	–	–

<sup>1</sup> При  $\sigma = 670 \text{ МПа}$

<sup>2</sup> Данные предоставлены Н. Ф. Измайловой

<sup>3</sup> При  $\sigma = 860 \text{ МПа}$

<sup>4</sup> Данные предоставлены В. А. Шундаловым

С целью соблюдения коммерческих интересов, оптимизированные режимы деформационной и термической обработки не раскрываются, но, как видно из табл. 2, большинство эксплуатационных характеристик удается существенно улучшить, что в свою очередь позволяет поднять на новый уровень качество авиационной техники.

### ИЗОТЕРМИЧЕСКАЯ ШТАМПОВКА ЛОПАТОК ГТД С ПРИМЕНЕНИЕМ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ

Заготовки с регламентированной УМЗ структурой были использованы для изготовления лопаток компрессора ГТД. Штамповка осуществлялась в изотермических условиях. Технологический процесс содержал операции высадки предварительной заготовки, штамповки и калибровки лопатки. Внешний вид отштампованных лопаток показан на рис. 9.



Рис. 9. Внешний вид отштампованных лопаток компрессора ГТД

Лопатки прошли необходимые виды контроля и механическую обработку (рис. 10).



Рис. 10. Внешний вид механически обработанных лопаток компрессора ГТД

### ВЫВОДЫ

1. Изотермическая штамповка в режиме низкотемпературной сверхпластичности позволяет получать из сплава ВТ6 изделия авиационного назначения с регламентированной УМЗ структурой и повышенными эксплуатационными свойствами. Дальнейшее управление свойствами успешно осуществляется путем термообработки.

2. Для подготовки УМЗ структуры при мелкосерийном производстве вполне пригодны операции осадки с переменной осью приложения нагрузки и последующая кузнечная протяжка на профильных бойках. Для серийного производства часть операций предпочтительно заменить более производительной прокаткой в сортовых калибрах.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Low Temperature Superplasticity Of Submicrocrystalline Titanium Alloys / G. A. Salishchev [et al.] // Mater. Sci. Forum. 1997. P. 585–590.
2. Формирование субмикроструктурной структуры в титане и титановых сплавах и их механические свойства / Г. А. Салищев [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. 2006. № 2. С. 19–26.
3. Male A. T., Cockett M. G. Method for the Determination of the Coefficient of Friction of Metals Under Conditions of Bulk Plastic Deformation // J. Instit. Metals. № 93. P. 38–46.
4. Механические свойства титанового сплава ВТ6 с субмикроструктурной структурой / Г. А. Салищев [и др.] // Металлы. 1999. № 6. С. 84–87.

### ОБ АВТОРАХ

**Астанин Владимир Васильевич**, проф. каф. материаловедения и физики металлов. Дипл. инженер по машинам и технологии обработки металлов давлением (УАИ, 1973). Д-р физ.-мат. наук (Московск. ин-т сталей и сплавов, 1996). Иссл. в обл. пластической и сверхпластической деформации.

**Сафин Фидус Файсханович**, ст. преп. каф. нанотехнологий. Дипл. инженер по машинам и технологии обработки металлов давлением (УГАТУ, 1996). Иссл. в обл. компьютер. моделирования и разработки технологических процессов.

**Кандаров Ирек Вилевич**, вед. инженер каф. физики. Дипл. инженер по машинам и технологии литейного производства (УГАТУ, 2004). Иссл. в обл. прогрессивных технологий машиностроения.

**Артюхин Юрий Васильевич**, вед. технолог цеха 2а ОАО «УМПО». Дипл. инженер по машинам и технологии обработки металлов давлением (УАИ, 1972). Иссл. в обл. прогрессивных технологий обработки металлов давлением.

**Половников Валерий Моисеевич**, вед. инженер НИЧ. Дипл. инженер по машинам и технологии обработки металлов давлением (УАИ, 1973). Иссл. в обл. прогрессивных технологий обработки металлов давлением.