

**ОПЫТ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ШТАМПОВОК ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ  
В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ ФГУП «ВИАМ»****О.С. Кашапов**

olegkashapov@yandex.ru

**Т.В. Павлова****В.С. Калашников**

vladimir.kalashnikovs@gmail.com

**К.Г. Лысов****ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ, Москва, Российская Федерация****Аннотация**

Показано влияние различных технологических аспектов изготовления полуфабрикатов из титанового сплава ВТ8 с применением штамповки в изотермических условиях на прессе усилием 16 000 кН. В качестве исходного материала использованы прутки из сплава ВТ8 по ОСТ 1 90266–86 и ОСТ 1 90107–73. Для штамповок, полученных из указанных прутков, определены балл, фон и тип микроструктуры, кратковременная прочность, удлинение, сужение, а также ударная вязкость при комнатной температуре. Для штамповок, изготовленных из прутка по ОСТ 1 90266–86, дополнительно оценено влияние термомеханической обработки на уровень свойств, а именно выполнена повторная калибровка половины штамповки. Микроструктура штамповок, изготовленных методом термомеханической обработки и подвергнутых старению, исследована дополнительно с помощью растровой электронной микроскопии. Отмечена прямая зависимость качества конечного полуфабриката в виде шайбы от качества исходного прутка. Установлено, что снижение температуры штамповки до уровня  $T_{\text{шт}} - 150$  °С приводит к недостаточной проработке структуры материала штамповки по сечению и, как следствие, наличию крупных зерен от исходного прутка. Так, на штамповках, изготовленных из прутка по ОСТ 1 90266–86, достигнут следующий уровень механических свойств:  $\sigma_b \geq 1000$  МПа,  $\delta \geq 11$  %,  $\psi \geq 20$  %,  $KCU \geq 40,3$  Дж/см<sup>2</sup>

**Ключевые слова**

*Титановые сплавы, изотермическая штамповка, микроструктура, механические свойства, термомеханическая обработка, калибровка, двойной отжиг*

Поступила 04.07.2019

Принята 25.05.2020

© Автор(ы), 2021

**Введение.** Процесс изотермической штамповки титановых сплавов достаточно широко известен и нашел применение в авиационной промышленности — операции штамповки в изотермических условиях использу-

ют при изготовлении штамповок лопаток компрессора газотурбинных двигателей и энергетических установок из двухфазных сплавов титана (BT3-1, BT6, BT8) и его модификаций (BT9 и BT18У) [1–4]. В отечественном машиностроении имели место попытки организации серийного производства раскатных дисков в изотермических условиях [5]. В работе [6] показана возможность получения относительно крупных прутковых заготовок с ультрамелкозернистой структурой путемковки в изотермических условиях. Одними из ключевых перспективных технологий для газотурбинных двигателей пятого поколения являются изотермическая формовка и сварка, используемые при изготовлении полых лопаток вентилятора [7]. Аналогичные процессы применимы в производстве сотовых конструкций для деталей планера [8]. Изотермическая объемная штамповка используется в основном при штамповке лопаток компрессора небольших габаритных размеров [9].

На металлургическом предприятии при изготовлении средне- и крупногабаритных штамповок лопаток с площадью проекции в плане более 500 см<sup>2</sup> процесс изотермической деформации применяется на операциях калибровки штамповок лопаток. Типичным для технологии изотермической деформации в промышленных условиях является применение в качестве исходной заготовки материала с «подготовленной» регламентированной (глобулярной, глобулярно-пластинчатой) микроструктурой, что позволяет проводить деформацию в определенных условиях, близких к сверхпластическим. Более того, ряд авторов рассматривают возможность изготовления штамповок из специально подготовленных мерных заготовок с ультрамелкозернистой микроструктурой (с размером частиц первичной  $\alpha$ -фазы менее 1 мкм) [10, 11]. В описанных случаях температуру изотермического деформирования устанавливают ниже типовой температуры горячей штамповки, что позволяет повысить эффективность рекристаллизации частиц первичной  $\alpha$ -фазы, получить минимальные припуски под механическую обработку изделий за счет снижения окисления и увеличить стойкость штамповой оснастки.

В США и странах Европы изготовление достаточно габаритных штамповок дисков (моноколес) из псевдо- $\alpha$ - и ( $\alpha + \beta$ )-титановых сплавов Ti-834, Ti-6242S, Ti-64, Ti-6246 в изотермических условиях освоено в середине 1980-х гг. и получило широкое распространение [12–14]. Для дисков из сплава Ti-834 штамповка в изотермических условиях является предпочтительной в связи с относительно узким температурным интервалом деформации [15].

Процессы объемной изотермической и квазиизотермической  $\beta$ -штамповки получили широкое распространение в КНР, в том числе при изготовлении деталей из отечественных титановых сплавов BT9, BT20 (TA15), BT25 и BT25У [16–19].

Во ФГУП «ВИАМ» организовано серийное производство штамповок дисков методом объемной горячей деформации в изотермических условиях из труднодеформируемых никелевых и титановых сплавов [20, 21]. Серийно изготавливаются штамповки массой от 9 до 25 кг из двухфазного сплава марки BT8 на прессе усилием 16 000 кН [22] с использованием крупногабаритных прутков диаметром 160...180 мм по ОСТ 1 90266–86 и ОСТ 1 90107–73. На этом оборудовании специалисты института проводят горячую деформацию малоразмерных титановых слитков диаметром до 180 мм собственного производства из серийных и опытных титановых сплавов различных классов.

Таким образом, в отличие от типовой области применения изотермической штамповки [23–26] на моторостроительных предприятиях авиационной отрасли, в данном случае на операциях горячей деформации, используется материал с неподготовленной крупнозернистой структурой, имеющей микроструктуру переходного или пластинчатого типа. Особенности деформирования жаропрочных титановых сплавов псевдо- $\alpha$ - и ( $\alpha + \beta$ )-классов с акцентом на металловедение (структуру и механические свойства конечных изделий) титановых сплавов рассмотрены в настоящей работе.

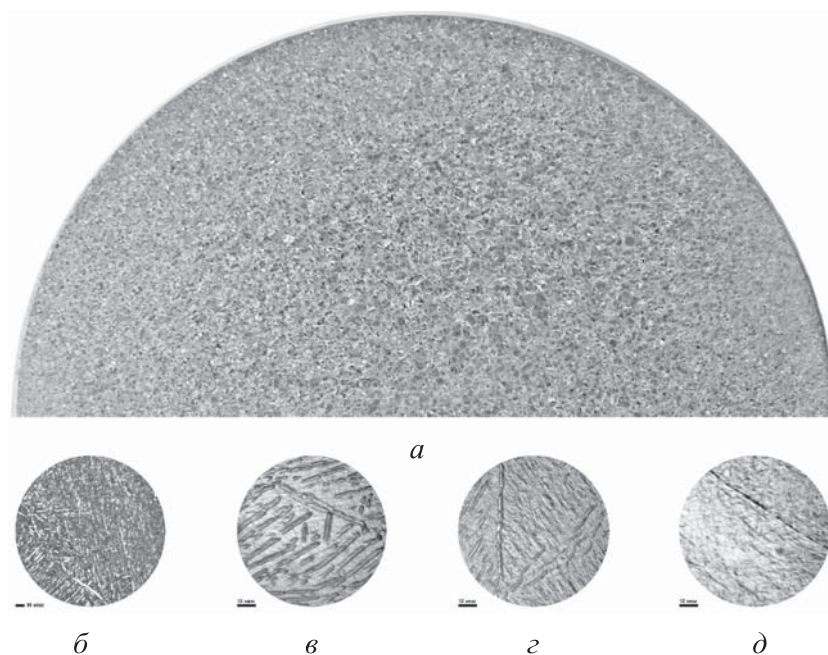
**Материалы и методы.** При изготовлении опытных штамповок в качестве исходных заготовок для горячей деформации в изотермических условиях использованы мерные заготовки, полученные из промышленных прутков диаметром 160 мм по техническим требованиям по ОСТ 1 90266–86 двух партий плавок и ОСТ 1 90107–73. Химический состав материала двух прутков по данным сертификата поставщика приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав материала прутков из сплава BT8

Партия, требования нормативной документации	Основные элементы, % мас.				Примеси, % мас.		
	Ti	Al	Mo	Si	O	N	H
Первая партия	Основа	6,78	3,4	0,27	0,087	0,004	0,0019
Вторая партия		6,92	3,37	0,33	0,102	0,004	0,0020
ГОСТ 19807–91		5,8–7	2,8–3,8	0,2–0,4	≤ 0,15	≤ 0,05	≤ 0,015

Прутки первой партии в поперечном сечении имеют блестящую макроструктуру, размер зерна соответствует 6–7 баллам по 10-бальной шкале макроструктур титановых сплавов (рис. 1, *a*).



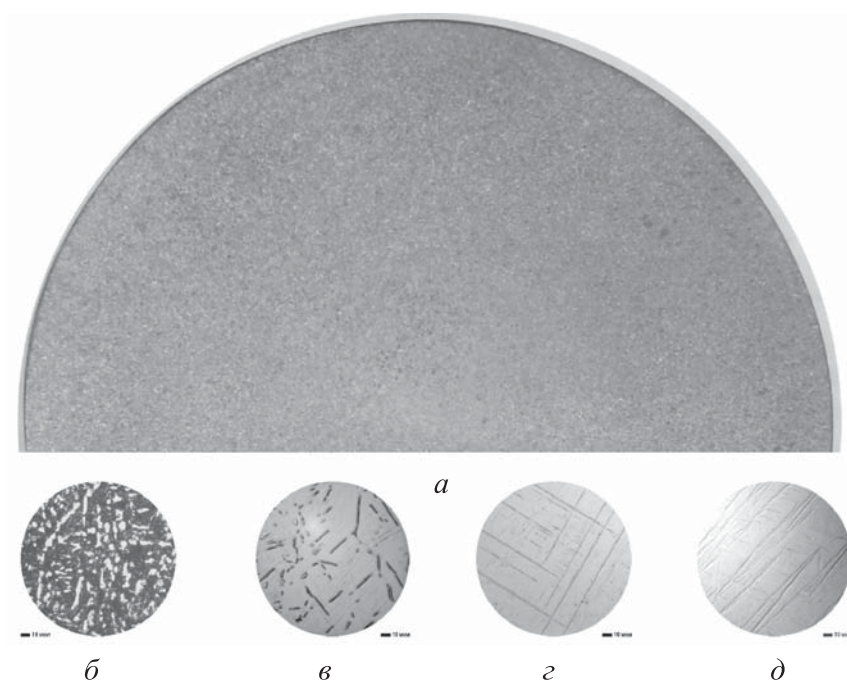
**Рис. 1.** Макроструктура исходного прутка диаметром 160 мм из сплава ВТ8, первая партия (*a*); микроструктура прутка диаметром 160 мм из сплава ВТ8 условно первой партии: *b* — исходное состояние; *b–d* — после закалки в воде ( $T_3 = 990, 1000$  и  $1010$  °С соответственно)

На рис. 1, *b–d* приведена микроструктура прутка в состоянии поставки, а также после закалки в воде от температуры 990...1010 °С.

Микроструктура — пластинчатая, 7-го типа по 9-типной шкале ВИАМ для ( $\alpha + \beta$ )-титановых сплавов. Температуру полного полиморфного превращения определяли методом пробных закалок. После закалки в воде от температуры 1010 °С  $\alpha$ -фазы в структуре материала не наблюдалось. Таким образом, температура полного полиморфного превращения плавки составляет 1005 °С (см. рис. 1, *b–d*).

Пруток второй партии в поперечном сечении имеет преимущественно матовую макроструктуру, с отдельными блестящими зернами, размер которых соответствует 5–6 баллам по 10-бальной шкале макроструктур титановых сплавов (рис. 2, *a*).

Микроструктура — глобулярно-пластинчатая, 2-го типа с участками типов 3 и 3а 9-типной шкалы ВИАМ для ( $\alpha + \beta$ )-титановых сплавов.

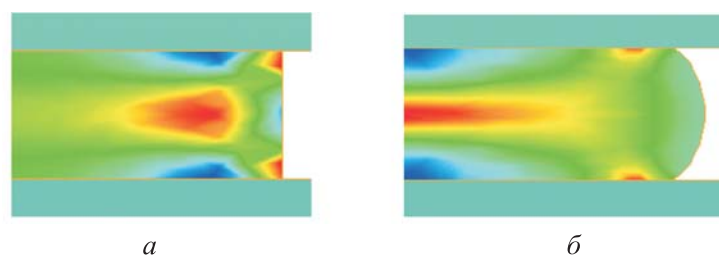


**Рис. 2.** Макроструктура исходного прутка диаметром 160 мм из сплава ВТ8, вторая партия (*а*); микроструктура прутка диаметром 160 мм из сплава ВТ8 условно второй партии: *б* — исходное состояние; *в-д* — после закалки в воде ( $T_3 = 1010, 1020$  и  $1030$  °С соответственно)

После закалки в воде от температуры  $1010$  °С  $\alpha$ -фазы в структуре материала не наблюдалось. Температура полного полиморфного превращения плавки составила  $1015$  °С (см. рис. 2, *б-д*). На мерные заготовки перед деформированием наносили эмаль марки ЭВТ-24.

В настоящей работе также рассмотрены результаты сдаточных испытаний серийных штамповок шифра ИШ-94 из сплава ВТ8, изготовленных из прутков диаметром  $160...200$  мм по ОСТ 1 90107-73 и прутков диаметром  $160$  мм по ОСТ 1 90266-86. Серийная технология изготовления предусматривает операции эмалирования мерных заготовок, предварительной и окончательной штамповки с последующей термической обработкой по типовому режиму двойного отжига, применяемому для сплава ВТ8. Штамповку и первую ступень отжига проводят при типичной температуре нагрева заготовок — на  $30...40$  °С меньше температуры полного превращения. Объем выборки для партий штамповок, изготовленных из прутка диаметром  $160...200$  мм по ОСТ 1 90107-73, составил 26 испытаний; из прутка по ОСТ 1 90266-86 — 52 испытания.

Прежде чем перейти непосредственно к эксперименту, рассмотрим результаты моделирования осадки в торец титановой заготовки. Для моделирования деформации в процессе осадки в торец мерной заготовки в программе Deform использованы данные процесса: температура нагрева образца 950 °С; температура нагрева бойков 950 °С; скорость деформации 5 мм/с; степень деформации 75 %. Результаты моделирования приведены на рис. 3.



**Рис. 3.** Модели распределения деформации:

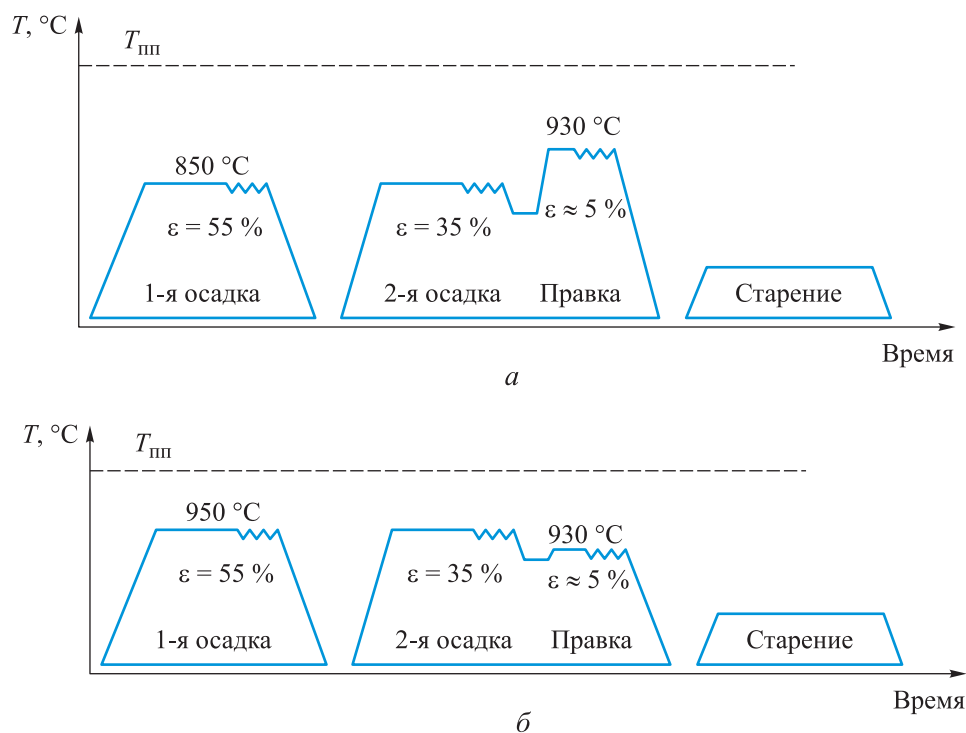
*a* — при идеальном смазывании торцов (тензор напряжений в каждом элементарном объеме соответствует одноосному сжатию); *б* — при наличии сил трения (тензор напряжений изменяется и соответствует одноосному сжатию со сдвиговыми компонентами)

В реальных условиях невозможно достичь идеального случая (рис. 3, *a*), поэтому в центральной части у поверхности заготовок образуется застойная зона, а в центральной части радиального сечения имеет место интенсивная деформация (рис. 3, *б*).

**Результаты испытаний.** Пресс усилием 16 000 кН, имеющийся во ФГУП «ВИАМ», позволяет варьировать скорость перемещения траверсы от 2 до 10 мм/с (при штамповке скорость, как правило, ограничена 8 мм/с). Отметим, что до недавнего времени скорость траверсы была ограничена 2 мм/с; для повышения скоростей деформации необходима модернизация прессы.

Относительно небольшие скорости деформации по сравнению с крупными промышленными ковочными гидравлическими и кривошипными прессами снижают эффективность наклепа материала, что тормозит процесс рекристаллизации как  $\beta$ -зерна, так и  $\alpha$ -фазы. Поэтому использование изотермической установки позволяет снизить температуру деформации материала и увеличить степень наклепа материала. Так, горячую деформацию большинства жаропрочных титановых сплавов в двухфазной температурной области в промышленных условиях проводят при температуре нагрева заготовки на 30 °С меньше температуры полного полиморфного превращения.

В первом эксперименте из прутка (условно первой партии) с исходной пластинчатой структурой были изготовлены две мерные заготовки, которые осаживали при температуре 950 и 850 °С по схемам, приведенным на рис. 4. Температура изотермической установки находилась в пределах 900...920 °С.

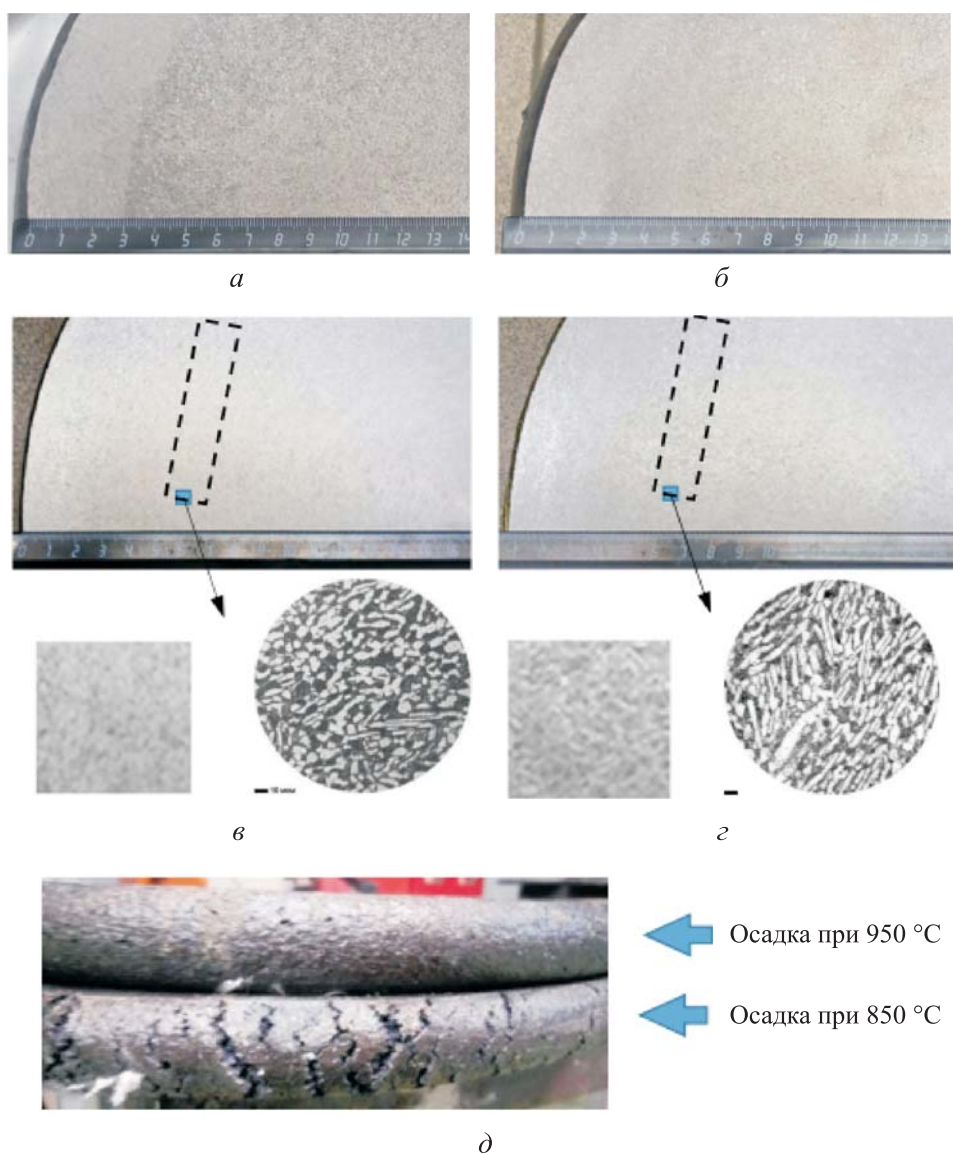


**Рис. 4.** Схемы горячей деформации; осадка и правка при температуре 850 (а) и 950 °С (б) и скорости передвижения траверсы 5...8 мм/с

Макроструктура заготовок после первой осадки (снят припуск 2 мм) приведена на рис. 5, а, б.

После первой осадки с деформацией  $\varepsilon = 55\%$  в материале заготовки, деформированной при относительно низкой температуре (850 °С), у поверхности имеется явно выраженная застойная зона с сохранившейся от исходного прутка макроструктурой. В случае с осадкой заготовки при 950 °С также наблюдается область с затрудненной деформацией, однако макроструктура в этой зоне — с отдельными блестящими зернами, без резкой границы перехода между периферийными областями материала с более интенсивной деформацией и застойной зоной.

Далее на заготовки повторно нанесли эмаль и осадили согласно схеме (рис. 4, а). Габаритные размеры штамповок составили: диаметр ~ 368 мм,



**Рис. 5.** Макроструктура заготовок после первой осадки ( $\epsilon = 55\%$ ) при  $850$  (а) и  $950$  °С (б); макро- и микроструктура штамповок после второй осадки ( $\epsilon = 35\%$ ), калибровки ( $\epsilon \approx 5\%$ ) и старения из прутка с крупнозернистой структурой; штамповка, осаженная при  $850$  (в) и  $950$  °С (з); д — образующая поверхность штамповок

толщина 28 мм. Макро- и микроструктура штамповок после второй осадки, калибровки и старения приведены на рис. 5, в, з.

Внешний вид образующей поверхности штамповок приведен на рис. 5, д. Штамповка, осаженная при  $850$  °С, имеет множественные трещины по образующей поверхности.



Материал штамповки, изготовленной осадкой при 950 °С, имеет более мелкозернистую и однородную структуру и более высокий уровень механических свойств (табл. 2). Полученных результатов достаточно, чтобы сделать вывод о нецелесообразности снижения температуры деформации от  $T_{\text{пл}} - 55$  до  $T_{\text{пл}} - 155$  °С при горячей деформации исходного материала с пластинчатой структурой.

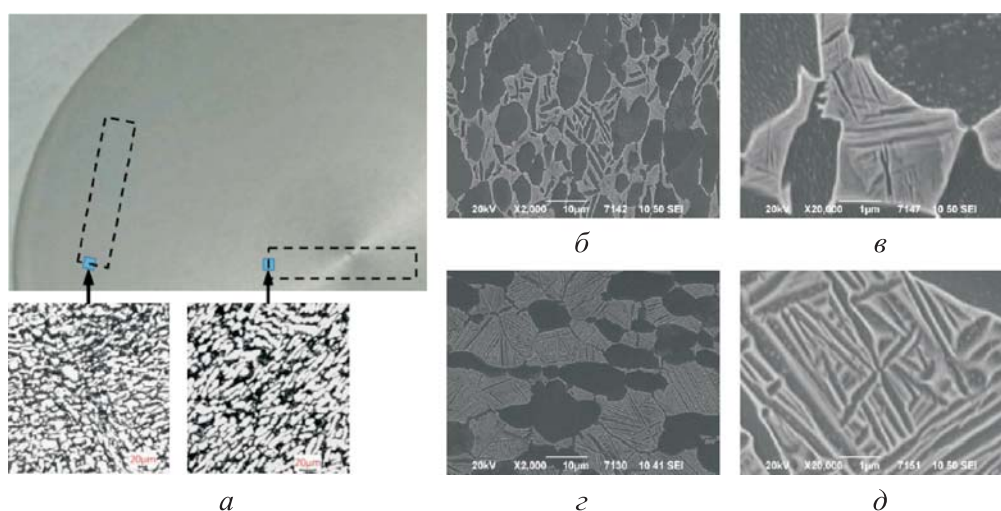
Таблица 2

**Структура и механические свойства экспериментальных штамповок, изготовленных из исходного прутка с крупнозернистой структурой**

Исходный материал / температура нагрева заготовок под осадку	Структура		Механические свойства		
	Макро	Микро	Предел прочности, $\sigma_b$ , МПа	Относительное удлинение, $\delta$ , %	Относительное сужение, $\psi$ , %
Пруток первой партии с крупнозернистой структурой / 850 °С	На периферии — матовая; в центре — смешанная, зерна 5–6 баллов	Тип 3а	1077	13,1	23,1
			1082	14,7	29,9
Пруток первой партии с крупнозернистой структурой / 950 °С	Матовая, зерна 4–5 баллов	Тип 2–3	1098	15,6	36,7
			1103	16,8	32,2

Во втором эксперименте использован исходный прутки с мелкозернистой структурой (условно вторая партия). Из прутка изготовлена мерная заготовка, которую деформировали по второй схеме (рис. 4, б), т. е. при температуре нагрева 950 °С. Структура материала штамповки приведена на рис. 6, механические свойства — в табл. 3.

Макроструктура штамповки, изготовленной из исходного прутка с мелкозернистой структурой — однородная, матовая, с зерном 4–5 баллов. Микроструктура материала — типа 3 с участками типов 2 и 3а. Экспериментальные штамповки изготовлены с применением термомеханической обработки (ТМО), т. е. с применением совмещения операций правки и высокотемпературной ступени отжига. Поскольку правку проводили при относительно низкой температуре 930 °С ( $T_{\text{пл}} - (75...85)$  °С), достичь высокой степени рекристаллизации (сфероидизации) частиц первичной  $\alpha$ -фазы при такой температуре невозможно. Для таких крупных штамповок



**Рис. 6.** Структура материала штамповки после осадки за два перехода (950 °С, правка и старение) из прутка с мелкозернистой структурой (*а*); микроструктура штамповки после повторной калибровки (растровая электронная микроскопия, *б–д*); состояние после калибровки и старения (*б, в*) и двойного отжига (*з, д*)

эффективность упрочнения от применения ТМО может быть минимальной из-за небольшой деформации при калибровке и динамической и статической рекристаллизации при правке и охлаждении. Чтобы оценить влияние ТМО на прочностные характеристики материала, половину штамповки, изготовленной из прутка с мелкозернистой структурой, подвергли повторной правке при температуре нагрева 930 °С с деформацией  $\varepsilon = 15\%$  с последующим старением. От полученной штамповки отрезали темплет, который отожгли по режиму двойного отжига (температура первой ступени 930 °С, т. е. такая же, как и при правке) с охлаждением на воздухе. Из этого материала были изготовлены образцы и исследована микроструктура (см. рис. 6).

Детальное исследование микроструктуры материала штамповки методом растровой электронной микроскопии позволило установить, что после ТМО структура состоит из глобулей первичной  $\alpha$ -фазы и крупных частиц вторичной  $\alpha$ -фазы (рис. 6, *б*), дисперсных частиц третичной  $\alpha$ -фазы, выделенных в  $\beta$ -прослойках (рис. 6, *в*). После двойного отжига наблюдается глобулярно-пластинчатая структура материала, представленная глобулями первичной  $\alpha$ -фазы и пластинками превращенной вторичной  $\alpha$ -фазы (рис. 6, *з, д*).

В табл. 3 приведены результаты испытаний образцов на растяжение.

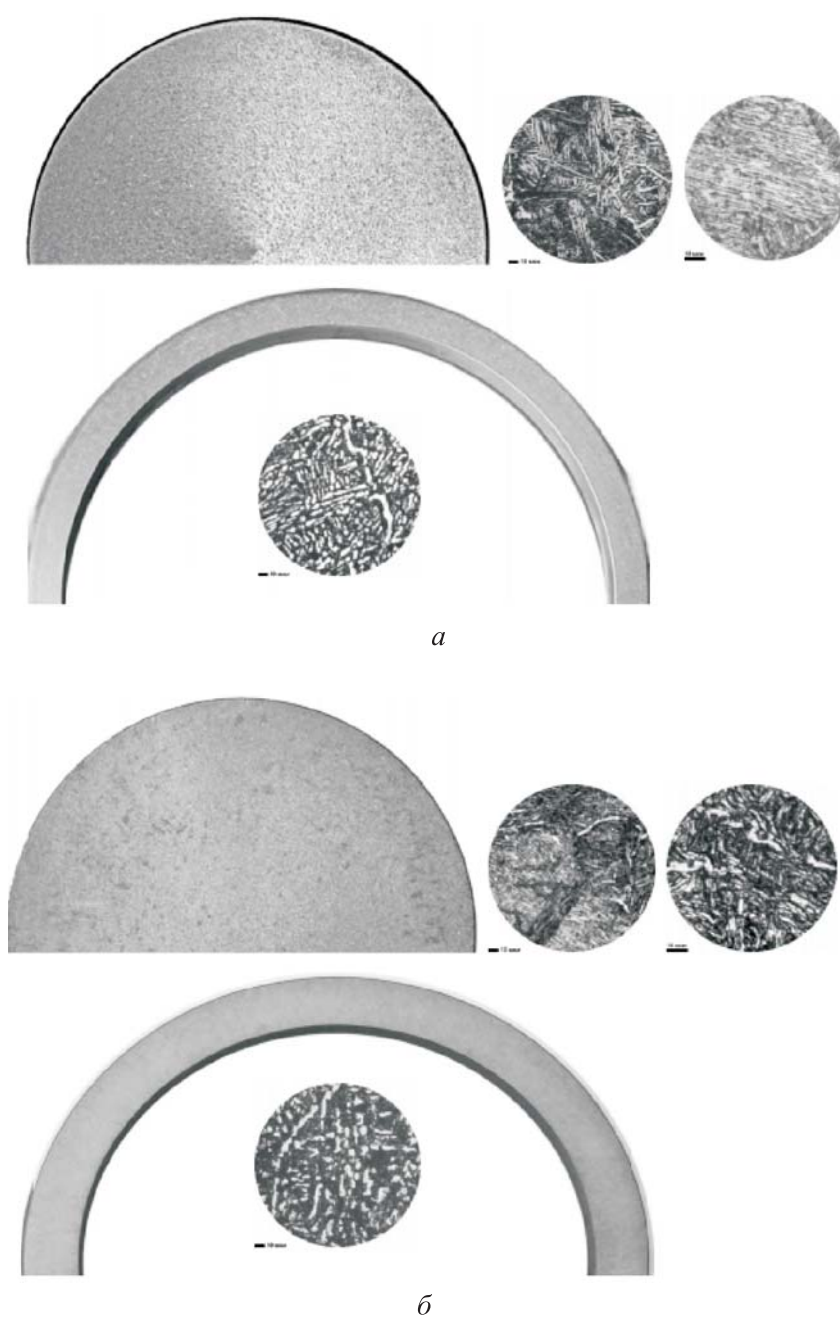
Таблица 3

**Механические свойства экспериментальной штамповки, изготовленной из исходного прутка с мелкозернистой структурой**

Исходный материал, место и направление вырезки образца, состояние	Механические свойства		
	Предел прочности, $\sigma_b$ , МПа	Относительное удлинение, $\delta$ , %	Относительное сужение, $\psi$ , %
Пруток второй партии, центр (радиальное направление), ТМО + старение	1059	16,3	36,2
	1068	15,1	34,8
Пруток второй партии, периферия (хордовое направление), ТМО + старение	1081	16,6	37,8
	1088	16,2	39,2
Пруток второй партии, периферия (хордовое направление), ТМО + старение (повторная правка)	1081	14,4	39,7
	1083	14,9	39,9
Пруток второй партии, периферия (хордовое направление), повторная правка, двойной отжиг	1064	16,2	40,1
	1069	17,1	39,7

От экспериментальных данных перейдем к рассмотрению имеющегося во ФГУП «ВИАМ» опыта по серийному изготовлению штамповок из сплава ВТ8. Первоначально для изготовления штамповок шифра ИШ-94 применяли прутки диаметром 160...200 мм с техническими требованиями по ОСТ 1 90107–73. В дальнейшем для повышения качества стали применять прутки диаметром 160 мм, аналогичный по параметрам структуры прутку из первой партии, применяемому в экспериментальном исследовании (см. рис. 1). Приведем типичную структуру прутков по ОСТ 1 90107–73 и ОСТ 1 90266–86 в состоянии поставки, а также структуру материала технологического припуска готовых штамповок, полученных из этих прутков (рис. 7).

Прутки с техническими требованиями по ОСТ 1 90107–73 имеют блестящую макроструктуру с зернами размером 5–7 баллов. Прутки диаметром 160 мм по ОСТ 1 90266–86 имеют блестящую или смешанную макроструктуру с отдельными блестящими зернами 4–6 баллов. Макро- и микроструктуры технологического припуска штамповок приведены в табл. 4, механические свойства штамповок — в табл. 5.



**Рис. 7.** Структура исходного прутка и технологического припуска готовых штамповок шифра ИШ-94:  
*a* — исходный пруток диаметром 160 мм по ОСТ 1 90107-73; *б* — исходный пруток по ОСТ 1 90266-86

Таблица 4

**Результаты контроля макро- и микроструктуры материала исходных прутков  
и материала технологического припуска штамповок**

Исходный пруток		Штамповка	
ОСТ 1 90107–73, диаметр 160...200 мм			
Макроструктура	Микроструктура	Макроструктура	Микроструктура
Зерна 5–7 баллов, блестящая	Тип 7	Зерна 4–6 баллов, матовая	Тип 3, 4
ОСТ 1 90266–86, диаметр 160 мм			
Зерна 4–6 баллов, блестящая	Тип 7	Зерна 4–6 баллов, матовая	Тип 2–3а

Таблица 5

**Механические свойства штамповок шифра ИШ-94 из сплава ВТ8  
в отожженном состоянии**

Характеристика	$\sigma_{\text{в}}^{20}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	КСУ, Дж/см <sup>2</sup>
Штамповки, изготовленные из прутка диаметром 160...200 мм, ОСТ 1 90107–73				
Минимальное значение	1020	11	20	43
Среднее значение	1035,5	14	28,33	53,28
Коэффициент вариации	1,26	12,73	14,06	11,68
Штамповки, изготовленные из прутка диаметром 160 мм, ОСТ 1 90266–86				
Минимальное значение	1000	12	25	40,3
Среднее значение	1021,7	14,8	31,3	52
Коэффициент вариации	1,65	10,7	9,95	11,1

**Обсуждение результатов.** Первоначально остановимся на вопросах, связанных непосредственно с особенностями изотермической деформации. В рассматриваемом случае речь идет о достаточно крупных изделиях массой 11,5...25 кг и площадью проекции в плане 530...960 см<sup>2</sup>. На отечественных машиностроительных предприятиях процесс изотермической штамповки применительно к жаропрочным титановым сплавам используют при изготовлении среднегабаритных штамповок лопаток с площадью проекции до 550 см<sup>2</sup> (штамповки лопатки компрессора габарита «С»),

масса которых, как правило, не превышает 5 кг. Более крупные лопатки штампуют на металлургическом предприятии, где изотермические условия деформации применяют ограниченно — только на операциях калибровки штамповок. Опыт изотермической деформации, которым располагают машиностроительные предприятия, в этом случае не применим, так как при штамповке небольших изделий (лопаток последних ступеней компрессоров низкого и высокого давления) используется катаный пруткок мелкого сорта с подготовленной мелкозернистой структурой и рекристаллизованной глобулярной  $\alpha$ -фазой, а штамповку проводят при относительно низких скоростях деформации  $\dot{\epsilon} = 0,05 \dots 2$  мм/с в условиях, близких к сверхпластической деформации (СПД) [7, 25]. Авторы работы [7] отмечают, что для сверхпластической формовки двухфазных титановых сплавов в изотермических условиях характерен диапазон скоростей деформации от  $10^{-5}$  до  $10^{-1}$  с $^{-1}$ . Для рассматриваемого случая осадки крупных заготовок диаметром до 160 мм со степенью деформации до 55 %, в диапазоне скоростей перемещения траверсы 2...10 мм/с реализуемый диапазон скоростей деформации ориентировочно составляет  $(\sim 1,5 \dots 7) \cdot 10^{-2}$  с $^{-1}$ . За рубежом при изготовлении относительно крупных штамповок из двухфазных жаропрочных титановых сплавов оптимальный диапазон скоростей деформации выбирают из диапазона  $10^{-3} \dots 10^{-1}$  с $^{-1}$  [18].

Суммарной накопленной деформации при данных скоростях, вероятно, недостаточно для интенсивного наклепа материала в процессе горячей деформации, что приводит к замедлению процессов динамической и статической рекристаллизации как  $\beta$ -зерна, так и  $\alpha$ -фазы. Для сравнения, промышленные ковочные гидравлические прессы работают на скорости порядка 15...30 мм/с.

Говоря о выборе скоростей деформации, с практической точки зрения, необходимо учитывать, что в условиях серийного производства при изготовлении партий штамповок вместо экспериментальных изотермических условий штамповка проходит в квазиизотермических условиях: боек отводится на высоту 180...200 мм при установке заготовки в рабочую зону прессы, за время загрузки, штамповки и выгрузки заготовки — подстывает. При минимальной скорости передвижения траверсы, соответствующей 2 мм/с, время первой осадки (см. рис. 4) составляет более 40 с, при выбранных скоростях передвижения траверсы (5...8 мм/с) время первой осадки составляет 10...17 с. Таким образом, для выбранных скоростей деформации снижение на  $\sim 100$  °С температуры инструмента вполне допустимо; теплообмен между титановой заготовкой и рабочей

поверхностью бойка из никелевого сплава не приводит к существенному изменению геометрии штамповки. Это особенно важно при изготовлении штамповок типа шайбы, когда не предусмотрено применение специальной оснастки (калибровочных колец, штампов). Снижение температуры инструмента при минимальной скорости траверсы до допустимого значения 850 °С происходит при штамповке 5–6 заготовок; при штамповке в выбранном диапазоне скоростей — 12 заготовок.

Считается, что для получения глобулярной структуры из исходной пластинчатой необходимо деформировать материал при температурах двухфазной области со степенью не менее 70 % [27]. Для рассматриваемых условий, в целях получения структуры со сфероидизированной  $\alpha$ -фазой требуется увеличение суммарной деформации. В штамповках, изготовленных за две операции осадки ( $\varepsilon = 55\%$  и  $\varepsilon = 35\%$ ), значительный объем материала составляют структуры переходного типа. Кроме того, в сплавах с высоким содержанием алюминия (BT8, BT9, BT3-1) при осадке исходных заготовок с крупнозернистой пластинчатой микроструктурой возможно появление горячих трещин по бочкообразной образующей поверхности (см. рис. 5, д). Появление наружных дефектов обусловлено  $\alpha$ -оторочкой по границам  $\beta$ -зерна, имеющей низкую пластичность из-за более высокого содержания алюминия по сравнению с  $\alpha$ -фазой внутри  $\beta$ -зерна [28]. Относительно появления горячих трещин при штамповке малолегированных двухфазных титановых сплавов можно ориентироваться на данные из работы [29–31] по сплаву Ti6-4.

Для процесса СПД сплава BT8 с исходной подготовленной структурой в изотермических условиях температура 850 °С является критической — дальнейшее ее уменьшение приводит к снижению характеристик относительного сужения с увеличением скорости деформации [7]. Кроме того, действующая нормативная технологическая документация регламентирует температуру окончания деформации до 800...850 °С в зависимости от применяемого оборудования, чем и обоснован выбор минимальной температуры штамповки 850 °С в эксперименте. Уменьшение температуры изотермической штамповки до  $T_{\text{пп}} - 155\text{ °С}$  (850 °С) не приводит к измельчению структуры материала, увеличивает зону затрудненной деформации, что негативно отражается на характеристиках пластичности материала (см. рис. 5 и табл. 2). Напомним, что изотермическая установка в данном случае дополнительно подогрела поверхность штамповки до температуры  $\sim 930\text{ °С}$  и на операции второй осадки, когда площадь поверхности заготовки существенно увеличена, температура

нагрева заготовки ощутимо влияет на величину требуемого усилия прессы, а именно при окончательной штамповке заготовок с температурой нагрева 850 °С требуется приложить усилие на 2000 кН больше, чем для заготовки, нагретой до 930 °С.

В случае применения в качестве исходной заготовки прутка с «подготовленной» мелкозернистой структурой также проявляется низкая эффективность наклепа: размер  $\beta$ -зерна снижается не более, чем на 1–2 балла, а первичная  $\alpha$ -фаза сохраняет низкую степень сфероидизации.

Метод ТМО применим для повышения прочностных характеристик крупных штамповок, изготовленных в изотермических условиях. Как правило, деформацию на операциях правки и калибровки ограничивают до 10 %, предполагая получение дисперсных составляющих микроструктуры в приповерхностных слоях заготовки (например, штамповки лопаток компрессора). В данном случае увеличение степени деформации при правке позволило достичь требуемого эффекта в центральной зоне по сечению штамповки, что подтверждают как исследования микроструктуры материала (см. рис. 6), так и полученный уровень механических свойств (см. табл. 3).

**Заключение.** На примере штамповок из сплава ВТ8 показано, что при деформации в изотермических условиях качество конечного полуфабриката для изготовления деталей из жаропрочных титановых сплавов напрямую зависит от исходного прутка. Так, разброс значений механических свойств относительно среднего значительно меньше в случае использования более качественного прутка с требованиями по ОСТ 1 90266–86 при несколько меньшей прочности и более высокой пластичности.

Снижение температуры деформации до  $T_{\text{III}} - 155$  °С приводит к недостаточной полной проработке материала в области деформации, появлению надрывов на бочкообразных поверхностях штамповок, а также незначительному снижению механических свойств.

Операции осадки в торец крупных мерных заготовок в изотермических условиях малоэффективны с точки зрения наклепа и рекристаллизации  $\beta$ -зерна и  $\alpha$ -фазы. Применение защитного технологического покрытия не позволяет избавиться от зон с затрудненной деформацией, расположенных по оси заготовки в приповерхностных слоях.

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Крымов В.В., ред. Производство лопаток газотурбинных двигателей. М., Машиностроение, Полет, 2002.



- [2] Болховитин М.С., Королёв Н.Н., Монахова В.П. Повышение эффективности управления технологическим процессом точной штамповки при изготовлении лопаток компрессора газотурбинных двигателей. *Труды МАИ*, 2015, № 81, с. 1–14.  
URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=57824>
- [3] Анищенко А.С. Анализ альтернативных технологий штамповки компрессорных лопаток для судовых двигателей. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: технічні науки*, 2015, т. 30, № 1, с. 141–148.
- [4] Боткин А.В., Вареник Е.В., Абрамов А.Н. Компьютерное проектирование изотермической штамповки имитатора компрессорной лопатки. *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*, 2017, т. 15, № 2, с. 40–47.  
DOI: <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-2-40-47>
- [5] Бурлаков И.А. Изготовление горячекатаных прутков круглого и шестигранного сечения из никелевых и титановых сплавов на прокатном стане «280–380». *Известия МГТУ-МАМИ*, 2009, № 1, с. 109–111.
- [6] Zherebtsov S.V., Salishchev G.A., Galeyev R.M., et al. Production of submicrocrystalline structure in large-scale Ti–6Al–4V billet by warm severe deformation processing. *Scr. Mater.*, 2004, vol. 51, no. 12, pp. 1147–1151.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2004.08.018>
- [7] Темис Ю.М., Худяков А.П. Математическое моделирование операций изотермической штамповки и сверхпластической формовки изготовления полой лопатки вентилятора. *Вестник УГАТУ*, 2015, т. 19, № 3, с. 50–60.
- [8] Перепелкин А.А., Матасов И.И., Нуждин Г.А. Изотермическое деформирование и диффузионная сварка элементов листовых конструкций из высокопрочных материалов. *Известия ТулГУ. Технические науки*, 2015, № 3, с. 72–81.
- [9] Боткин А.В., Вареник Е.В., Абрамов А.Н. Компьютерное проектирование изотермической штамповки имитатора компрессорной лопатки. *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*, 2017, т. 15, № 2, с. 40–47.  
DOI: <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-2-40-47>
- [10] Астанин В.В., Сафин Ф.Ф., Кандаров И.В. и др. Применение низкотемпературной сверхпластичности для изделий авиационного назначения. *Вестник УГАТУ*, 2012, т. 16, № 7, с. 12–16.
- [11] Семенова И.П., Полякова В.В., Валиев Р.Р. и др. Микроструктура и свойства лопаток компрессора ГТД, полученных объемной штамповкой из ультрамелкозернистого сплава ВТ6. *ФТВД*, 2011, т. 21, № 4, с. 86–95.
- [12] Jackson M. *Microstructural evolution of titanium alloys during isothermal subtransus forging*. London, University of London Press, 2002.
- [13] Chen C.C., Coyne J.E. Deformation characteristics of Ti–6Al–4V alloy under isothermal forging conditions. *Metall. Mater. Trans. A*, 1976, vol. 7, no. 12, pp. 1931–1940.  
DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02659826>
- [14] Bache M.R., Cope M., Davies H.M., et al. Dwell sensitive fatigue in a near alpha titanium alloy at ambient temperature. *Int. J. Fatigue*, 1997, vol. 19, no. 93, pp. 83–88.  
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(97\)00020-0](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(97)00020-0)

- [15] Balasundar I., Raghu T., Kashyap B.P. Modeling the hot working behavior of near- $\alpha$  titanium alloy IMI 834. *Prog. Nat. Sc.*, 2013, vol. 23, no. 6, pp. 598–607.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2013.11.004>
- [16] Balasundar I., Raghu T., Kashyap B.P. Modeling the high temperature deformation behaviour of a near alpha titanium alloy with bi-modal microstructure. *Mater. Sc. Forum*, 2012, vol. 710, pp. 533–538. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.710.533>
- [17] Liu Y., Baker T.N. Deformation characteristics of IMI685 titanium alloy under  $\beta$  isothermal forging conditions. *Mater. Sc. Eng. A*, 1995, vol. 197, no. 10, pp. 125–131. DOI: [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(95\)09691-4](https://doi.org/10.1016/0921-5093(95)09691-4)
- [18] Li X., Lu S.Q., Fu M.W., et al. The optimal determination of forging process parameters for Ti–6.5Al–3.5Mo–1.5Zr–0.3Si alloy with thick lamellar microstructure in two phase field based on P-map. *J. Mater. Process. Technol.*, 2010, vol. 210, no. 2, pp. 370–377. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.09.026>
- [19] Yang X., Guo H., Yao Z., et al. Effect of isothermal forging strain rate on microstructures and mechanical properties of BT25y titanium alloy. *Mater. Sc. Eng. A*, 2016, vol. 673, pp. 355–361. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.07.084>
- [20] Zhang S., Zeng W., Zhao Q., et al. High cycle fatigue of isothermally forged Ti–6.5Al–2.2Mo–2.2Zr–1.8Sn–0.7W–0.2Si with different microstructures. *J. Alloys Compd.*, 2016, vol. 689, pp. 114–122. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.07.277>
- [21] Бакрадзе М.М., Скугорев А.В., Кучеряев В.В. и др. Компьютерное моделирование технологических процессов обработки металлов давлением как инструмент разработки новых технологий. *Авиационные материалы и технологии*, 2017, № S, с. 175–185.
- [22] 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, № S, с. 129–141.
- [23] Пономаренко Д.А., Скугорев А.В., Сидоров С.А. и др. Технологические возможности специализированных изотермических прессов силой 6,3 и 16 МН в производстве деталей авиационного назначения. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением*, 2015, № 9, с. 36–40.
- [24] Каблов Е.Н. Ключевая проблема — материалы. Тенденции и ориентиры инновационного развития России. М., ВИАМ, 2015, с. 458–464.
- [25] 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, с. 3–33.
- [26] Пономаренко Д.А., Скугорев А.В., Сидоров С.А. и др. Влияние теплообмена между заготовкой и штампом на процесс штамповки заготовок деталей авиационно-космического назначения на специализированных изотермических прессах. *Труды ВИАМ*, 2016, № 10, с. 37–45.  
DOI: <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2016-0-10-3-3>

[27] Ночовная Н.А. Исследование влияния параметров изотермической деформации и термической обработки на структуру и механические свойства штамповки из сплава ВТ6ч. *Труды ВИАМ*, 2017, № 10, с. 24–32.

DOI: <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2017-0-10-3-3>

[28] Аношкин Н.Ф., Ерманок М.З., ред. Полуфабрикаты из титановых сплавов. М., ВИЛС, 1996.

[29] Золотов А.М., Чижик Т.А., Смирнов М.О. Построение диаграмм рекристаллизации третьего рода титанового сплава ВТ6. *Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки*, 2017, т. 23, № 4, с. 118–126.

[30] Seshacharyulu T., Medeiros S.C., Frazier W.G., et al. Microstructural mechanisms during hot working of commercial grade Ti–6Al–4V with lamellar starting structure. *Mater. Sc. Eng. A*, 2002, vol. 325, no. 1-2, pp. 112–125.

DOI: [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(01\)01448-4](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(01)01448-4)

[31] Semiatin S.L., Goetz R.L., Shell E.B., et al. Cavitation and failure during hot forging of Ti–6Al–4V. *Metall. Mater. Trans. A*, 1999, vol. 30, no. 5, pp. 1411–1424.

DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-999-0289-0>

**Кашапов Олег Салаватович** — канд. техн. наук, начальник сектора ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ (Российская Федерация, 105005, Москва, ул. Радио, д. 17).

**Павлова Тамара Васильевна** — ведущий инженер ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ (Российская Федерация, 105005, Москва, ул. Радио, д. 17).

**Калашников Владимир Сергеевич** — инженер 1-й категории ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ (Российская Федерация, 105005, Москва, ул. Радио, д. 17).

**Лысов Кирилл Геннадиевич** — инженер 1-й категории ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ (Российская Федерация, 105005, Москва, ул. Радио, д. 17).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Кашапов О.С., Павлова Т.В., Калашников В.С. и др. Опыт изготовления штамповок из титановых сплавов в производственных условиях ФГУП «ВИАМ». *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2021, № 1 (136), с. 133–155. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2021-1-133-155>

**EXPERIENCE IN MANUFACTURING TITANIUM ALLOY FORGINS  
IN VIAM PLANT CONDITIONS**

**O.S. Kashapov**

[olegkashapov@yandex.ru](mailto:olegkashapov@yandex.ru)

**T.V. Pavlova**

**V.S. Kalashnikov**

[vladimir.kalashnikovs@gmail.com](mailto:vladimir.kalashnikovs@gmail.com)

**K.G. Lysov**

**Federal State Unitary Enterprise All-Russian Scientific Research Institute  
of Aviation Materials State Research Center of the Russian Federation,  
Moscow, Russian Federation**

**Abstract**

The purpose of the study was to reveal the effect of various technological aspects of manufacturing titanium alloy BT8 (VT8) forgings under isothermal conditions on a press with a force of 1600 kN. The starting material was OST 1 90266–86 and OST 1 90107–73 VT8 (BT8) alloy bars. For the forgings obtained from these rods, the score and background of the macrostructure, the type of microstructure, short-term strength, elongation, contraction and impact toughness at room temperature were determined. For forgings made from an OST 1 90266–86 bar, the effect of thermomechanical treatment on the level of properties was additionally evaluated, namely, half of the forging was recalibrated. The microstructure of the forgings which were made by thermomechanical treatment and aged was additionally investigated using scanning electron microscopy. Findings of research show a direct dependence of the quality of the final semi-finished product on the quality of the original bar. It has been established that lowering the punching temperature to the level of  $T_{pp} - 150$  °C leads to insufficient development of the structure of the deformed material over the cross section, and results in the presence of large grains from the initial bar. So, on forgings made from an OST 1 90266–86 bar, the following level of mechanical properties was achieved:  $\sigma_v \geq 1000$  MPa,  $\delta \geq 11$  %,  $\psi \geq 20$  %,  $KCU \geq 40.3$  J/cm<sup>2</sup>

**Keywords**

*Titanium alloys, isothermal forging, microstructure, mechanical properties, thermomechanical treatment, calibration, double annealing*

Received 04.07.2019

Accepted 25.05.2020

© Author(s), 2021

**REFERENCES**

- [1] Krymov V.V., ed. *Proizvodstvo lopatok gazoturbinykh dvigateley* [Production of blades for gas-turbine engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., Polet Publ., 2002.
- [2] Bolkhovitin M.S., Korolev N.N., Monakhova V.P. The improving the efficiency of management of technological processes in the manufacture of precision molded compressor blades of turbojet. *Trudy MAI*, 2015, no. 81, pp. 1–14 (in Russ.). Available at: <http://trudymai.ru/published.php?ID=57824>
- [3] Anishchenko A.S. Analysis of alternative technologies for forging compressor blades of ship engines. *Visnik Priazovskogo derzhavnogo tekhnichnogo universitetu. Seriya: tekhnichni nauki* [Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical Sciences], 2015, vol. 30, no. 1, pp. 141–148 (in Russ.).
- [4] Botkin A.V., Varenik E.V., Abramov A.N. Computer design of imitation compressor blade isothermal forging. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2017, vol. 15, no. 2, pp. 40–47 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-2-40-47>

- [5] Burlakov I.A. Manufacturing of round and square hot-rolled bars of nickel and titanic alloy on the rolling mill “280–380”. *Izvestiya MGTU-MAMI*, 2009, no. 1, pp. 109–111 (in Russ.).
- [6] Zherebtsov S.V., Salishchev G.A., Galeyev R.M., et al. Production of submicrocrystalline structure in large-scale Ti–6Al–4V billet by warm severe deformation processing. *Scr. Mater.*, 2004, vol. 51, no. 12, pp. 1147–1151.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2004.08.018>
- [7] Temis Yu.M., Khudyakov A.P. Mathematical modeling of isothermal punching and superplasticity forming of hollow fan blade. *Vestnik UGATU*, 2015, vol. 19, no. 3, pp. 50–60 (in Russ.).
- [8] Perepelkin A.A., Matasov I.I., Nuzhdin G.A. Isothermal deformation and diffusion welding elements sheet construction from high grade materials. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [News of the Tula State University. Technical Sciences], 2015, no. 3, pp. 72–81 (in Russ.).
- [9] Botkin A.V., Varenik E.V., Abramov A.N. Computer design of imitation compressor blade isothermal forging. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2017, vol. 15, no. 2, pp. 40–47 (in Russ.).  
DOI: <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-2-40-47>
- [10] Astanin V.V., Safin F.F., Kandarov I.V., et al. Low temperature applications superplasticity for aviations products. *Vestnik UGATU*, 2012, vol. 16, no. 7, pp. 12–16 (in Russ.).
- [11] Semenova I.P., Polyakova V.V., Valiev R.R., et al. Microstructure and properties of blades of GTE compressor produced by die forging of ultra-fine grained BT6 alloy. *FTVD [PHPT]*, 2011, vol. 21, no. 4, pp. 86–95 (in Russ.).
- [12] Jackson M. Microstructural evolution of titanium alloys during isothermal subtransus forging. London, University of London Press, 2002.
- [13] Chen C.C., Coyne J.E. Deformation characteristics of Ti–6Al–4V alloy under isothermal forging conditions. *Metall. Mater. Trans. A*, 1976, vol. 7, no. 12, pp. 1931–1940.  
DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02659826>
- [14] Bache M.R., Cope M., Davies H.M., et al. Dwell sensitive fatigue in a near alpha titanium alloy at ambient temperature. *Int. J. Fatigue*, 1997, vol. 19, no. 93, pp. 83–88.  
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(97\)00020-0](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(97)00020-0)
- [15] Balasundar I., Raghu T., Kashyap B.P. Modeling the hot working behavior of near- $\alpha$  titanium alloy IMI 834. *Prog. Nat. Sc.*, 2013, vol. 23, no. 6, pp. 598–607.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2013.11.004>
- [16] Balasundar I., Raghu T., Kashyap B.P. Modeling the high temperature deformation behaviour of a near alpha titanium alloy with bi-modal microstructure. *Mater. Sc. Forum*, 2012, vol. 710, pp. 533–538. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.710.533>
- [17] Liu Y., Baker T.N. Deformation characteristics of IMI685 titanium alloy under  $\beta$  isothermal forging conditions. *Mater. Sc. Eng. A*, 1995, vol. 197, no. 10, pp. 125–131.  
DOI: [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(95\)09691-4](https://doi.org/10.1016/0921-5093(95)09691-4)

- [18] Li X., Lu S.Q., Fu M.W., et al. The optimal determination of forging process parameters for Ti–6.5Al–3.5Mo–1.5Zr–0.3Si alloy with thick lamellar microstructure in two phase field based on P-map. *J. Mater. Process. Technol.*, 2010, vol. 210, no. 2, pp. 370–377. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.09.026>
- [19] Yang X., Guo H., Yao Z., et al. Effect of isothermal forging strain rate on microstructures and mechanical properties of BT25y titanium alloy. *Mater. Sc. Eng. A*, 2016, vol. 673, pp. 355–361. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.07.084>
- [20] Zhang S., Zeng W., Zhao Q., et al. High cycle fatigue of isothermally forged Ti–6.5Al–2.2Mo–2.2Zr–1.8Sn–0.7W–0.2Si with different microstructures. *J. Alloys Compd.*, 2016, vol. 689, pp. 114–122. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.07.277>
- [21] Bakradze M.M., Skugorev A.V., Kucheryaev V.V., et al. Computer modeling of technological metal forming processes as effective instrument for development of new technologies. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2017, no. 5, pp. 175–185 (in Russ.).
- [22] Kablov E.N., Ospennikova O.G., Lomberg B.S. Complex innovation technology of isothermal forging in air under the superplasticity conditions of superalloy discs. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2012, no. 5, pp. 129–141 (in Russ.).
- [23] Ponomarenko D.A., Skugorev A.V., Sidorov S.A., et al. Technological capabilities of specialized isothermal presses with maximum force 6.3 and 16 MN in the manufacture of parts for aviation and space purposes. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka metallov davleniem* [Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure], 2015, no. 9, pp. 36–40 (in Russ.).
- [24] Kablov E.N. Klyuchevaya problema — materialy. Tendentsii i orientiry innovatsionnogo razvitiya Rossii [Key issue — materials. Trends and ranging mark of innovative Russia development]. Moscow, VIAM Publ., 2015, pp. 458–464 (in Russ.).
- [25] Kablov E.N. Innovative developments of FSUE “VIAM” SSC of RF on realization of Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2015, no. 1, pp. 3–33 (in Russ.).
- [26] Ponomarenko D.A., Skugorev A.V., Sidorov S.A., et al. Influence of heat exchange between workpiece and die on forming process of aerospace parts by special isothermal presses. *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM], 2016, no. 10, pp. 37–45 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2016-0-10-3-3>
- [27] Nochovnaya N.A. Research of the influence of parameters of isothermal deformation and heat treatment on structure and mechanical properties punchings from alloy VT6ch. *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM], 2017, no. 10, pp. 24–32 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2017-0-10-3-3>
- [28] Anoshkin N.F., Ermanok M.Z., eds. Polufabrikaty iz titanovykh splavov [Half-blanks from titanium alloys]. Moscow, VILS Publ., 1996.

[29] Zolotov A.M., Chizhik T.A., Smirnov M.O. Drawing the third kind recrystallization curves of titanium alloy BT6. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbPU. Estestvennye i inzhenernye nauki* [St. Petersburg Polytechnic University Journal of Engineering Science and Technology], 2017, vol. 23, no. 4, pp. 118–126 (in Russ.).

[30] Seshacharyulu T., Medeiros S.C., Frazier W.G., et al. Microstructural mechanisms during hot working of commercial grade Ti–6Al–4V with lamellar starting structure. *Mater. Sc. Eng. A*, 2002, vol. 325, no. 1-2, pp. 112–125.

DOI: [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(01\)01448-4](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(01)01448-4)

[31] Semiatin S.L., Goetz R.L., Shell E.B., et al. Cavitation and failure during hot forging of Ti–6Al–4V. *Metall. Mater. Trans. A*, 1999, vol. 30, no. 5, pp. 1411–1424.

DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-999-0289-0>

**Kashapov O.S.** — Cand. Sc. (Eng.), Head of the Sector, Federal State Unitary Enterprise All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials State Research Center of the Russian Federation (Radio ul. 17, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Pavlova T.V.** — Lead Engineer, Federal State Unitary Enterprise All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials State Research Center of the Russian Federation (Radio ul. 17, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Kalashnikov V.S.** — Engineer of the 1st category, Federal State Unitary Enterprise All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials State Research Center of the Russian Federation (Radio ul. 17, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Lysov K.G.** — Engineer of the 1st category, Federal State Unitary Enterprise All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials State Research Center of the Russian Federation (Radio ul. 17, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Kashapov O.S., Pavlova T.V., Kalashnikov V.S., et al. Experience in manufacturing titanium alloy forgings in VIAM plant conditions. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2021, no. 1 (136), pp. 133–155 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2021-1-133-155>