

Научная статья

УДК 621.7

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-52-63

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СПЛАВА VT3-1 ПРИМЕНительно К ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ШТАМПОВОК ДИСКОВ И ЛОПАТОК

М.С. Яшин¹, Д.В. Капитаненко¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Изучены свойства и структуры поковок из титанового сплава VT3-1, полученные методом изотермической деформации в условиях НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ. Проведена осадка по схеме лопаток и дисков со степенью деформации 60 и 80 % соответственно. Штамповки подвергнуты низкотемпературному, изотермическому и двойному отжигу. Установлено, что сплав VT3-1 имеет высокую технологическую пластичность в интервале температур ниже границы полиморфного превращения. Штамповки показали требуемый уровень свойств при деформации в $(\alpha + \beta)$ -области.

Ключевые слова: титан, изотермическая деформация, отжиг, штамповка, титановый жаропрочный сплав VT3-1

Для цитирования: Яшин М.С., Капитаненко Д.В. Исследование структуры и свойств сплава VT3-1 применительно к технологии получения штамповок дисков и лопаток // Труды ВИАМ. 2023. № 8 (126). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-52-63.

Scientific article

INVESTIGATION OF THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF THE VT3-1 ALLOY IN RELATION TO THE TECHNOLOGY FOR OBTAINING STAMPINGS OF DISKS AND TURBINE BLADES

M.S. Yashin¹, D.V. Kapitanenko¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. Properties and structure of forgings made of titanium alloy VT3-1, obtained by isothermal deformation under the conditions of the National Research Center «Kurchatov Institute» – VIAM presented in present paper. The draft was carried out according to the scheme of blades with a degree of deformation of 60 % and according to the scheme of disks with a degree of deformation of 80 %. The forgings were subjected to low-temperature, isothermal and double annealing. It has been investigated that the VT3-1 alloy has a high technological plasticity in the temperature range below the polymorphic transformation limit. Stampings show the required level of properties when deformed in the $(\alpha + \beta)$ -area.

Keywords: titanium, isothermal deformation, annealing, stamping, titanium heat resistant alloy VT3-1

For citation: Yashin M.S., Kapitanenko D.V. Investigation of the structure and properties of the VT3-1 alloy in relation to the technology for obtaining stampings of disks and turbine blades. *Trudy VIAM*, 2023, no. 8 (126), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-52-63.

Введение

Изотермическая деформация – это процесс обработки давлением заготовки в штампе, который нагрет до температуры деформации. В отличие от сверхпластичности, при изотермической деформации отсутствуют регламентированный скоростной диапазон деформации и требования к структуре материала заготовки. Методом изотермической деформации возможно изготавливать точные штамповки большой сложности с широкими полотнами, высокими и тонкими ребрами, к которым предъявляются повышенные требования к структуре и механическим свойствам [1]. Изотермическая штамповка применяется для изготовления лопаток на различных стадиях, которые включают в себя предварительное перераспределение металла исходной цилиндрической заготовки, штамповку и правку-калибровку [2].

В настоящее время изотермическая штамповка титановых сплавов широко распространена на отечественных и зарубежных предприятиях [3]. Титановые сплавы обладают требуемыми механическими и эксплуатационными свойствами для применения в авиапромышленности [4]. Для изготовления штамповок из титановых сплавов применяются крупные литые штампы из никелевых сплавов типа ЖС6У [5, 6]. При деформации заготовок из титанового сплава в изотермических условиях изменение скорости деформации не оказывает существенного влияния на напряженно-деформированное состояние процесса штамповки [7].

Штамповка титановых сплавов методом изотермической деформации способствует равномерному протеканию процесса деформации по всему объему заготовки. Кроме того, благодаря такому методу обработки давлением возможно контролировать степень наклепа и формировать регламентированную структуру зерна на стадии первичной рекристаллизации [8].

Прохождение рекристаллизации с получением контролируемого размера зерна в сплаве обеспечивается путем обработки давлением в изотермических условиях по оптимальным режимам деформации. Структура с минимальным размером β -зерна (5–15 мкм) формируется в $(\alpha+\beta)$ -области при динамической рекристаллизации в процессе изотермической штамповки [8].

Исследования показали, что формирование подобной рекристаллизационной структуры, которая обеспечит контролируемый рост зерен, позволит получать штампованные полуфабрикаты с повышенными характеристиками вязкости разрушения [8].

Титановый сплав ВТ3-1 является одним из самых распространенных сплавов в авиационной промышленности России, поэтому его изучение представляет особый интерес. Сплав ВТ3-1 по ГОСТ 19807–91 имеет следующий химический состав, % (по массе):

Al	Mo	Cr	C	Fe	Si	N	Ti
5,5–7	2–3	0,8–2	До 0,1	0,2–0,7	0,15–0,4	До 0,05	85,95–91,05

Механические свойства сплава ВТ3-1 с различной структурой следующие:

σ_b , МПа	δ , %	ψ , %	KCU, кДж/м ²	Диаметр отпечатка, мм
1000–1200	Не менее 10	Не менее 30	Не менее 3	3,2–3,3

Статистика показала, что предел прочности штамповок из сплавов ВТ3-1 и ВТ6 может зависеть только от химического состава приблизительно в 25–65 % случаев. В то время как зависимость только от типа и подтипа структуры составляет ~20 %. При одновременном учете влияния состава и структуры различие может достигать 50–65 %. В случае определения пластичности и ударной вязкости это значение гораздо меньше – порядка 20–35 % [9].

Исследования поковок из сплава ВТЗ-1, которые имеют равноосную и переходную структуру, показали, что регрессионные зависимости для оценки среднего уровня механических свойств зависят от химического состава и структуры с вероятностью 0,95 [9].

Изучение химического состава в поковках из сплава ВТЗ-1 показало, что β -фаза становится более прочной, но менее пластичной из-за увеличения содержания хрома по сравнению с β -фазой, стабилизированной Мо. Увеличение содержания молибдена препятствует образованию химического соединения $TiCr_2$, которое охрупчивает сплав [10].

Увеличение содержания Cr и Mo способствует увеличению количества β -фазы, что оказывает влияние на прочностные характеристики сплава [10]. Выяснено, что при достижении предельных значений (допустимых ГОСТ) процентного содержания Cr и Mo следует осуществлять термообработку по схеме двойного отжига. Это уменьшит количество β -фазы, что способствует восстановлению пластичности [10].

При осуществлении изотермической штамповки с припуском 0,2 мм и менее на сторону при заключительных операциях, требующих более точной оснастки (П-переход и правка), наблюдается большой износ штампов. Это происходит под влиянием высокой температуры и значительных усилий штамповки [11]. Снижение температуры установки и усилий штамповки при приложении циклической нагрузки позволит уменьшить износ штамповки и увеличить съём штамповок.

В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ рассмотрен процесс штамповки с минимальным припуском заготовок лопаток из титановых сплавов. Кроме того, изучены возможности повышения стойкости ковочного инструмента для изотермической штамповки лопаток газотурбинных двигателей. Для оптимизации режимов обработки давлением методом изотермической штамповки и повышения стойкости инструмента предварительно получена мелкозернистая структура заготовки под изотермическую штамповку. В результате изучения процесса изотермической деформации заготовок из титанового сплава ВТ6 обнаружено, что предел текучести снижается при температуре 820 °С. Это позволяет уменьшить температуру обработки давлением при штамповке полуфабриката. В результате стойкость штампов повышается [12].

Изотермическая деформация позволяет получать полуфабрикаты из титановых сплавов, трудоемкость изготовления которых меньше по сравнению с трудоемкостью изготовления деталей из поковок и плит по традиционной многопереходной технологии [13].

Изучение влияния режимов изотермической деформации и термообработки на структуру и свойства поковок из титановых сплавов показало, что значение относительного удлинения увеличивается до 14 % на конечной стадии обработки давлением при применении метода изотермической штамповки. Рекристаллизационный отжиг позволяет сформировать структуру, которая оптимальна для достижения значений кратковременной прочности не менее 995 МПа [13].

Изучение свойств на полуфабрикатах, полученных методом изотермической деформации по схемам штамповки лопаток и дисков, вызывает большой интерес на отечественных и зарубежных предприятиях [14].

Изучение процессов уменьшения размера зерен лучше проводить на исходной крупной структуре, именно такую структуру имеют заготовки под штамповку дисков из титановых сплавов. В качестве исходного материала использовали плавки с различными макро- (первого и шестого баллов) и микроструктурами (третьего и девятого типов). Крупная структура получена специальным отжигом в β -области в течение 1 ч [15, 16].

Основная цель данной работы – изучение свойств и структуры поковок из титанового сплава ВТЗ, полученных методом изотермической деформации в условиях НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Материалы и методы

Деформацию осуществляли на гидравлическом прессе усилием 630 тонн с использованием установки типа УИДИН (установка индукционного нагрева). В табл. 1 даны исходная структура, температура нагрева заготовок, температуры деформации и отжига. Проводили осадку со степенью деформации 60 % при штамповке лопаток и со степенью деформации 80 % за один проход при штамповке дисков на высокой заготовке.

Для термообработки лопаток выбран низкотемпературный отжиг при 600 °С и изотермический отжиг при 870 °С. Для дисков применяли изотермический отжиг при 870 °С и двойной отжиг при температурах 920 и 650 °С. Исследованию макро- и микроструктуры подвергали по одной штамповке от каждого режима штамповки и термообработки.

Таблица 1

**Исходная структура, температура нагрева заготовок,
температура деформации и отжига сплава ВТЗ-1**

Свойства	Значения свойств по типу осадки штамповки					
	дисков			лопаток		
Балл исходной макро-структуры	1	6	6	1	6	6
Температура нагрева, °С	930	930	1050	930	930	1050
Температура в установке типа УИДИН, °С	900±10			900±10		
Термическая обработка	Низкотемпературный отжиг при температуре 600 °С			Изотермический отжиг при температуре 870 °С		
	Изотермический отжиг при температуре 870 °С			Двойной отжиг при температурах 920 и 650 °С		

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты и обсуждение

Для определения температурного интервала горячего деформирования, в том числе и деформирования в изотермических условиях, изучена технологическая пластичность в интервале температур 600–1200 °С.

Установлено, что при обычных условиях деформации все титановые сплавы независимо от типа (α , $\alpha+\beta$ и β) имеют следующие особенности:

- ограниченную технологическую пластичность при температурах ниже границы полиморфного превращения, что затрудняет обработку при этих температурах;
- практически неограниченную технологическую пластичность (без учета хрупкого альфирированного слоя) при температурах, соответствующих β -области;
- большое упрочнение при деформации в интервале температур, лежащих ниже границы полиморфного превращения, что повышает сопротивление обработки давлением и вызывает неравномерную деформацию;
- малую прочность и отсутствие упрочнения при температурах, соответствующих β -области, что объясняется полнотой протекания рекристаллизационных процессов при обработке давлением.

В отличие от испытаний технологической пластичности в обычных условиях, испытания в изотермических условиях показали, что двухфазный титановый сплав ВТЗ-1 имеет практически неограниченную технологическую пластичность при осадке лопаток в торец вплоть до температур на 250–300 °С ниже температур полиморфного превращения (табл. 2).

Технологическая пластичность сплава ВТЗ-1 в изотермических условиях

Температура, °С	Степень деформации, %, для штамповки		σ_B , МПа
	дисков	лопаток	
600	30	70	450
700	70	80	220
800	70	80	100
900	80	80	50
1000	80	80	30
1100	–	–	30

На рис. 1–3 показаны макро- и микроструктуры заготовок из сплава ВТЗ-1 до и после обработки. Установлено, что нагрев и деформация в $(\alpha + \beta)$ -области заготовок с матовой макроструктурой первого балла обеспечивает в штамповках аналогичную матовую макроструктуру независимо от схемы осадки. Микроструктура значительно измельчается с 3–4 до 1–2 типа. Характер микроструктуры определяется термической обработкой. Наибольшее количество β -фазы (темный фон) дает двойной отжиг, затем низкотемпературный отжиг. Структура после такой термообработки напоминает по текстуре и количеству β -фазы структуру после высокотемпературной термомеханической обработки. Изотермический отжиг дает наименьшее количество β -фазы – равномерную $\alpha + \beta$ равноосную микроструктуру.

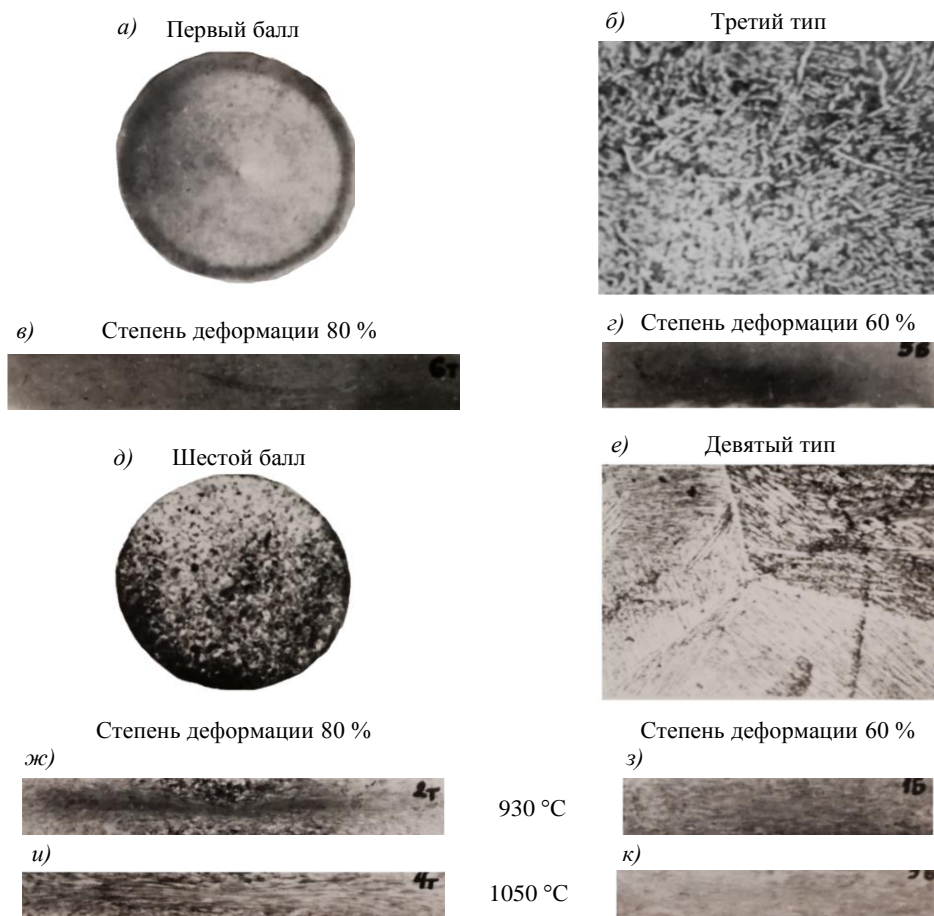


Рис. 1. Макро- (а, д) и микроструктура (б, е; $\times 300$) исходной заготовки и макроструктура осадженных образцов из сплава ВТЗ-1 в зависимости от исходной структуры, температуры нагрева (изотермические условия) и схем осадки штамповок дисков (в, г) и лопаток (ж–к)

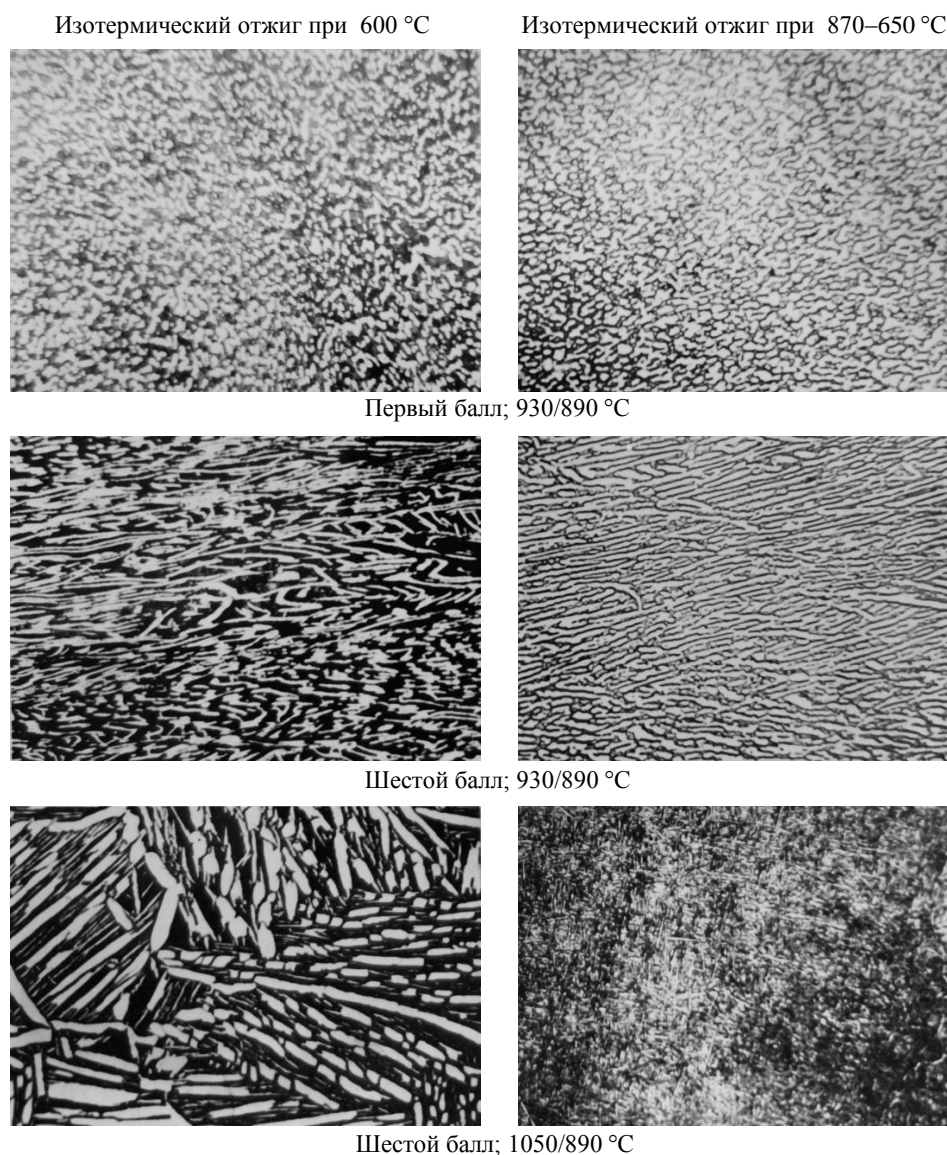


Рис. 2. Микроструктура сплава ВТЗ-1 в зависимости от исходной структуры, температуры нагрева (изотермические условия) и режимов отжига при осадке по схеме штамповки лопаток. Здесь и далее: в числителе – температура заготовки, в знаменателе – температура в установке типа УИДИН (см. табл. 1)

Исходная крупнозернистая макро- и микроструктура шестого балла и микроструктура девятого типа не обеспечивают равномерной микро- и макро-структуры по сечению штамповок. При штамповке лопаток практически отсутствует зона затрудненной деформации, в то время как при штамповке дисков наблюдаются слабдеформированные зоны, прилегающие к торцевым поверхностям заготовок.

По макро-структуре наибольшее отличие имеют заготовки, штампованные по схеме дисков с нагревом в $(\alpha + \beta)$ - и β -области. Так, при нагреве в $(\alpha + \beta)$ -области наблюдается широкая область с проработанной матовой макро-структурой первого балла. В то время как при нагреве в β -области эта зона состоит из вытянутых в направлении течения материала зерен, которые, как подтверждают микроисследования, не дробятся, как это имеет место при нагреве в $(\alpha + \beta)$ -области, а вытягиваются в направлении деформации с сохранением границ первичного β -зерна.

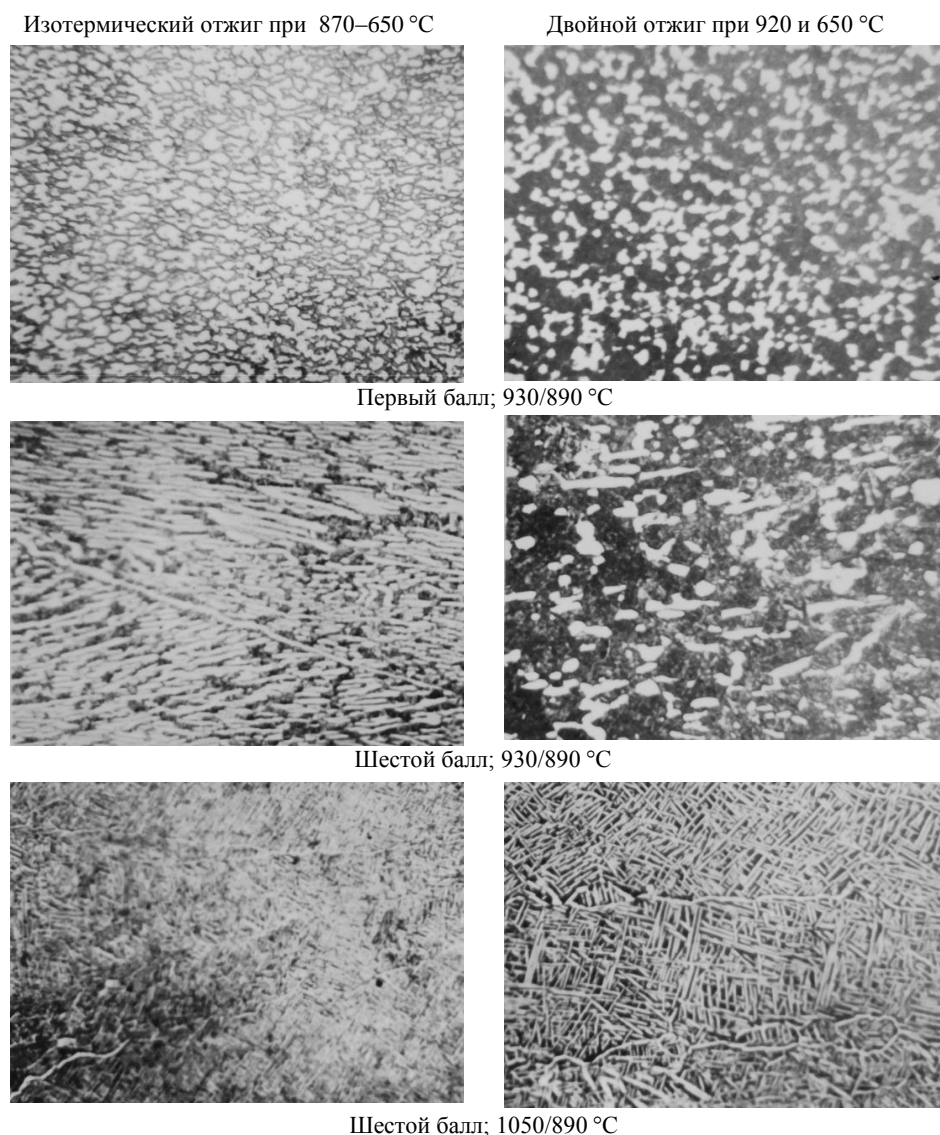


Рис. 3. Микроструктура сплава ВТЗ-1 в зависимости от исходной структуры, температуры нагрева (изотермические условия) и режимов отжига при осадке по схеме штамповки дисков

Изучение механических свойств штамповок, полученных по схеме лопаток (табл. 3), позволило установить:

- исходная структура, соответствующая первому баллу макрозерна и третьему типу микроструктуры, независимо от отжига обеспечивает требуемый уровень прочностных и пластических характеристик;
- низкотемпературный отжиг дает более высокий уровень прочности (1250–1350 МПа) по сравнению с изотермическим отжигом, однако при этом пластичность значительно снижена и не обеспечивает требуемого уровня свойств при исходной крупнозернистой структуре;
- изотермический отжиг обеспечивает требуемый уровень свойств при штамповке из $(\alpha + \beta)$ -области заготовок даже с крупнозернистой структурой;
- уровень ударной вязкости при изотермическом отжиге на 50 кДж/м^2 больше, чем при низкотемпературном. Неравномерная структура, которая соответствует нагреву и деформации в β -области при исходной крупнозернистой структуре, дает наименьший уровень свойств.

Таблица 3

Влияние исходной структуры, температуры нагрева и режимов отжига на механические свойства сплава ВТЗ-1 при осадке по схеме штамповок лопаток ($\epsilon = 60\%$)

Свойства	Значения свойств при типе отжига					
	изотермическом			низкотемпературном		
	при температуре, °С					
	930		1050	930		1050
Балл макро-структуры	1	6	6	1	6	6
σ_b , МПа	1150	1160	1200	1350	1320	1250
δ , %	16	14	9	13	6	5
ψ , %	53	32	13	47	15	11
KCU , кДж/м ²	450	350	450	40	270	350

Результаты исследования механических свойств штамповок, полученных по схеме деформации дисков, показаны в табл. 4. Исследование позволило установить:

- полученные свойства при всех режимах штамповки и термообработки удовлетворяют требованиям технических условий;
- уровень пластичности, особенно поперечное сужение, при изотермическом отжиге снижается с 55 до 35 % при применении исходной крупной структуры по сравнению с мелкой и затем с 35 до 22 % – при повышении температуры нагрева с 930 до 1050 °С;
- ударная вязкость намного выше при нагреве под деформацию в β -области, что связано со степенью протекания рекристаллизационных процессов в материале.

Таким образом, исследования показали, что при нагреве и деформации в $(\alpha + \beta)$ -области даже при исходной крупнозернистой структуре в заготовках типа дисков можно получить уровень свойств, значительно превышающий требуемый.

Таблица 4

Влияние исходной структуры, температуры нагрева и режимов отжига на механические свойства сплава ВТЗ-1 при осадке по схеме штамповок дисков ($\epsilon = 80\%$)

Свойства	Значения свойств при типе отжига					
	изотермическом			низкотемпературном		
	при температуре, °С					
	930		1050	930		1050
Балл макро-структуры	1	6	6	1	6	6
σ_b , МПа	1100	1180	1230	1250	1230	1200
δ , %	16	12	10	14	13	12
ψ , %	55	35	20	52	40	22
KCU , кДж/м ²	350	40	50	40	350	50

В табл. 5 представлены результаты испытаний на кратковременную прочность, значения которой возрастают с увеличением балла макроструктуры в обоих случаях при температуре 930 °С. Для лопаток значения кратковременной прочности меньше в случае изотермического отжига вне зависимости от балла и температуры нагрева. Для дисков значения кратковременной прочности при изотермическом отжиге больше, чем при двойном отжиге для макроструктуры обоих баллов при температуре 930 °С. В случае образцов с шестым баллом макроструктуры при температуре 1050 °С значение кратковременной прочности больше при двойном отжиге.

Таблица 5

Кратковременная прочность (σ_b) сплава ВТЗ-1 при температуре 450 °С

Вид поковки	Режим штамповки и термообработки	σ_b , МПа, для образцов с макроструктурой, балл		
		1	6	
		при температуре нагрева, °С		
		930		1050
Лопатки	Низкотемпературный отжиг при 600 °С	930	995	980
	Изотермический отжиг при 870 °С	772	788	853
Диски	Изотермический отжиг при 870 °С	817	995	873
	Двойной отжиг при 920 и 650 °С	712	918	915

В табл. 6 представлены результаты испытаний на длительную прочность. В случае штамповок лопаток с низкотемпературным отжигом образцы как с первым, так и с шестым баллом макроструктуры разрушались при нагрузке 850 МПа. В остальных случаях образцы сняты без разрушения. После штамповки дисков с изотермическим отжигом с шестым баллом макроструктуры и нагревом до 930 °С разрушение образцов произошло при нагрузке 700 МПа. Кроме того, разрушились образцы с шестым баллом макроструктуры и нагревом до 930 °С при нагрузке 800 МПа при штамповке дисков с двойным отжигом.

Таблица 6

Длительная прочность (σ_{100}) сплава ВТЗ-1 при температуре 450 °С

Вид поковки	Режим штамповки и термообработки	σ_{100} , МПа, для образцов с макроструктурой, балл					
		1		6			
		при температуре нагрева, °С					
		930			1050		
		Напряже- ние, МПа	Время до разруше- ния, ч	Напряже- ние, МПа	Время до разруше- ния, ч	Напряже- ние, МПа	Время до разруше- ния, ч
Лопатки	Низкотемпературный отжиг при 600 °С	60	232	60	298	60	256
		70	231	70	229	70	192
		85	9	85	78	85	63
	Изотермический отжиг при 870 °С	60	462	–	–	–	–
Диски	Изотермический отжиг при 870 °С	–	–	60	341	–	–
		–	–	70	126	70	261
		60	330	60	462	–	–
	Двойной отжиг при 920 и 650 °С	–	–	80	83	80	188

Таким образом, исследования длительной прочности показали, что указанный в технических условиях уровень свойств для сплава ВТЗ-1 (550 МПа за 100 ч) перекрывается более чем на 200 МПа независимо от схемы штамповки, структуры и термообработки.

Заключения

В данной работе изучена технологическая пластичность титанового сплава ВТЗ-1 в изотермических условиях при осадке по двум схемам в условиях НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ. Установлено, что двухфазный сплав ВТЗ-1 имеет высокую технологическую пластичность в интервале температур вплоть до температур на 150–250 °С ниже границы полиморфного превращения, причем при осадке лопаток температурный интервал деформации на 100 °С уже.

Изучение структуры и свойств штамповок из сплава ВТЗ-1, полученных по схемам деформации лопаток и дисков, показало, что штамповки, полученные по схеме деформации лопаток, обеспечивают требуемый уровень свойств при условии деформации в $(\alpha + \beta)$ -области и структуре исходного материала, соответствующей первому баллу макроструктуры и третьему типу микроструктуры. Штамповки, полученные по схеме деформации дисков, обеспечивают требуемый уровень свойств с достаточным запасом при условии исходной крупнозернистой структуры. Однако деформация должна осуществляться в $(\alpha + \beta)$ -области.

Полученные результаты исследования отражены в разработанной в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ производственной инструкции (ПИ 1.108–2011).

Список источников

1. Каблов Е.Н., Путьрский С.В., Яковлев А.Л., Крохина В.А., Наприенко С.А. Исследование сопротивления усталостному разрушению штамповок из высокопрочного титанового сплава ВТ22М, изготовленных с заключительной деформацией в $(\alpha+\beta)$ - и β -областях // Титан. 2021. № 1 (70). С. 26–33.
2. 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. № 5. С. 129–141.
3. Каблов Е.Н., Бакрадзе М.М., Громов В.И., Вознесенская Н.М., Якушева Н.А. Новые высокопрочные конструкционные и коррозионностойкие стали для аэрокосмической техники разработки ФГУП «ВИАМ» (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 1 (58). С. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11.
4. Ночовная Н.А., Ширяев А.А., Шарапкин Д.С. Комплекс механических и эксплуатационных свойств катаных заготовок из псевдо- β -титанового сплава ВТ47 // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 3 (68). Ст. 05. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 16.05.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-50-59.
5. Пономаренко Д.А., Скугорев А.В., Сидоров С.А., Шпагин А.С. Влияние теплообмена между заготовкой и штампом на процесс штамповки заготовок деталей авиационно-космического назначения на специализированных изотермических прессах // Труды ВИАМ. 2016. № 10 (46). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.05.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-10-3-3.
6. Разуваев Е.И., Моисеев Н.В., Капитаненко Д.В., Бубнов М.В. Современные технологии обработки металлов давлением // Труды ВИАМ. 2015. № 2. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.05.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-2-3-3.
7. Путьрский С.В., Арисланов А.А., Артеменко Н.И., Яковлев А.Л. Различные методы повышения износостойкости титановых сплавов и сравнительный анализ их эффективности применительно к титановому сплаву ВТ23М // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 1 (50). С. 19–24. DOI: 10.18577/2071-9240-2018-0-1-19-24.
8. Моисеев Н.В., Разуваев Е.И. Формирование рекристаллизованной структуры в деформированных полуфабрикатах из титановых сплавов переходного класса, полученных изотермической штамповкой // Металловедение и термическая обработка металлов. 2002. № 7. С. 43–47.
9. Егорова Ю.Б., Давыденко Л.В., Белова С.Б., Чибисова Е.В. Прогнозирование механических свойств поковок из титановых сплавов ВТ6 и ВТЗ-1 в зависимости от химического состава и структуры // Известия вузов. Цветная металлургия. 2018. № 1. С. 12–21.
10. Бургонова О.Ю., Пантюхова К.Н., Белозерова Е.П. Определение рационального режима термической обработки сплава ВТЗ-1 для повышения пластичности перед обработкой давлением // Омский научный вестник. 2017. № 3 (153). С. 44–48.
11. Скугорев А.В., Капитаненко Д.В., Шишков С.Ю., Мельникова Д.А. Формирование структуры и механических свойств высоколегированных титановых сплавов при изотермической штамповке на воздухе // Титан. 2021. № 3 (72). С. 34–40.

12. Головкин С.А., Первов М.Л., Воздвиженская М.В., Скобелева А.С. Изотермическая штамповка точных заготовок лопаток газотурбинных двигателей под безразмерную обработку профиля пера // Заготовительные производства в машиностроении (кузнечно-прессовое, литейное и другие производства). 2016. № 10. С. 24–27.
13. Яковлев А.Л., Арисланов А.А., Путырский С.В., Ночовная Н.А. Исследование механических свойств и структуры крупногабаритных полуфабрикатов из титанового сплава VT6ч // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 4 (61). С. 12–18. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-12-18.
14. 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 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
15. Дзунович Д.А., Лукина Е.А., Яковлев А.Л. Влияние режимов термической обработки на технологичность и механические свойства листов из высокопрочного титанового сплава VT23 // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 3 (52). С. 3–10. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-3-10.
16. Путырский С.В., Яковлев А.Л., Ночовная Н.А., Крохина В.А. Исследование влияния различных режимов термической обработки на свойства полуфабрикатов и сварных соединений из сплава VT22M // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 1 (54). С. 3–10. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-3-10.

References

1. Kablov E.N., Putyrsky S.V., Yakovlev A.L., Krokhina V.A., Naprienko S.A. Investigation of resistance to fatigue failure of forgings from high-strength titanium alloy VT22M, manufactured with final deformation in ($\alpha + \beta$)- and β -regions. *Titan*, 2021, no. 1 (70), pp. 26–33.
2. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Lomberg B.S. Complex innovative technology of isothermal punching on air in mode of superplasticity of disks from superhot strength alloys. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. 5, pp. 129–141.
3. Kablov E.N., Bakradze M.M., Gromov V.I., Voznesenskaya N.M., Yakusheva N.A. New high strength structural and corrosion-resistant steels for aerospace equipment developed by FSUE «VIAM» (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11.
4. Nochovnaya N.A., Shiryayev A.A., Sharapkin D.S. Complex of mechanical and operational properties of rolled blanks from metastable- β -titanium alloy VT47. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 3 (68), paper no. 05. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 16, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-50-59.
5. Ponomarenko D.A., Skugorev A.V., Sidorov S.A., Shpagin A.S. Influence of heat exchange between workpiece and die on forming process of aerospace parts by special isothermal presses). *Trudy VIAM*, 2016, no. 10, paper no. 3. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 12, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-10-3-3.
6. Razuvaev E.I., Moiseev N.V., Kapitanenko D.V., Bubnov M.V. Modern technologies of plastic working of metals. *Trudy VIAM*, 2015, no. 2, paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 12, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-2-3-3.
7. Putyrskij S.V., Arislanov A.A., Artemenko N.I., Yakovlev A.L. Different methods of wear resistance increase of titanium alloys and comparative analysis of their efficiency for VT23M titanium alloy. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 1, pp. 19–24. DOI: 10.18577/2071-9240-2018-0-1-19-24.
8. Moiseev N.V., Razuvaev E.I. Formation of a recrystallized structure in deformed semi-finished products from titanium alloys of a transitional class, obtained by isothermal stamping. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov*, 2002, no. 7, pp. 43–47.
9. Egorova Yu.B., Davydenko L.V., Belova S.B., Chibisova E.V. Prediction of the mechanical properties of forgings from titanium alloys VT6 and VT3-1 depending on the chemical composition and structure. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya*, 2018, no. 1, pp. 12–21.

10. Burgonova O.Yu., Pantyukhova K.N., Belozerova E.P. Determination of the rational mode of heat treatment of the VT3-1 alloy to increase plasticity before pressure treatment. *Omskiy nauchnyy vestnik*, 2017, no. 3 (153), pp. 44–48.
11. Skugorev A.V., Kapitanenko D.V., Shishkov S.Yu., Melnikova D.A. Formation of the structure and mechanical properties of high-alloy titanium alloys during isothermal forging in air. *Titan*, 2021, no. 3 (72), pp. 34–40.
12. Golovkin S.A., Pervov M.L., Vozdvizhenskaya M.V., Skobeleva A.S. Isothermal stamping of precision blanks of gas turbine engine blades for dimensionless processing of the airfoil profile. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroyenii (kuznechno-pressovoye, liteynoye i drugiye proizvodstva)*, 2016, no. 10, pp. 24–27.
13. Yakovlev A.L., Arislanov A.A., Putyrsky S.V., Nochovnaya N.A. Study of mechanical properties and structure of large-sized semi-finished products made of VT6ch titanium alloy. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 4 (61), pp. 12–18. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-12-18.
14. 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». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
15. Dzunovich D.A., Lukina E.A., Yakovlev A.L. Influence of heat treatment parameters on producibility and mechanical properties of sheets made from high-strength titanium alloy VT23. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 3 (52), pp. 3–10. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-3-10.
16. Putyrskiy S.V., Yakovlev A.L., Nochovnaya N.A., Krokhina V.A. Research of different heat treatment modes influence on properties of semi-finished products and welded joints from titanium alloy VT22M. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 1 (54), pp. 3–10. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-3-10.

Информация об авторах

Яшин Максим Сергеевич, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Капитаненко Денис Владимирович, начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Maksim S. Yashin, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Denis V. Kapitanenko Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 30.05.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 02.06.2026.
The article was submitted 30.05.2023; approved and accepted for publication after reviewing 02.06.2026.