

Научная статья

УДК 669.295

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-19-34

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СВОЙСТВ ЖАРОПРОЧНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT46 В ЛИТОМ И ДЕФОРМИРОВАННОМ СОСТОЯНИИ

О.С. Кашапов<sup>1</sup>, М.А. Макушина<sup>1</sup>, В.С. Калашников<sup>1</sup>, О.Ю. Лаврова<sup>1</sup>

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

**Аннотация.** Приведено сравнение основных механических свойств прутков, поковок, цельнокатаных и кованных колец, отливок из жаропрочного титанового псевдо- $\alpha$ -сплава VT46 (VT46L), а также сплавов-аналогов по классу и применению в интервале рабочих температур. Отдельно представлены показатели длительной прочности при температурах 500 и 550 °С. Показаны результаты исследований структуры материала из указанных полуфабрикатов. Дано обобщенное описание технологии изготовления полуфабрикатов с указанием на особенности, отличающие сплав VT46 от серийных титановых сплавов. Обсуждаются возможные области применения сплава VT46 применительно к деталям двигателей и авиационной техники.

**Ключевые слова:** жаропрочные титановые сплавы, титановый сплав VT46, поковки, отливки, механические свойства, микроструктура

**Для цитирования** Кашапов О.С., Макушина М.А., Калашников В.С., Лаврова О.Ю. Сравнительный анализ свойств жаропрочного титанового сплава VT46 в литом и деформированном состоянии // Труды ВИАМ. 2025. № 9 (151). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-19-34.

Scientific article

## COMPARATIVE ANALYSIS OF MECHANICAL PROPERTIES OF HEAT-RESISTANT TITANIUM ALLOY VT46 IN CAST AND FORGED CONDITIONS

O.S. Kashapov<sup>1</sup>, M.A. Makushina<sup>1</sup>, V.S. Kalashnikov<sup>1</sup>, O.Yu. Lavrova<sup>1</sup>

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

**Abstract.** The paper presents comparison of main mechanical properties of rods, forgings and castings made of heat-resistant titanium pseudo- $\alpha$  alloy VT46 (VT46L), as well as similar alloys of the same class and application in the range of operating temperatures. Values of long-term strength at 500 and 550 °C have been presented specifically. The article shows microstructure study results of the said semi-finished products material. It provides a generalized description of the technology for manufacturing semi-finished products, indicating features that distinguish VT46 alloy from serial titanium alloys. Possible application areas of VT46 alloy in relation to engine parts and aircraft equipment are discussed.

**Keywords:** heat-resistant titanium alloys, titanium alloy VT46, forgings, castings, mechanical properties, microstructure

**For citation:** Kashapov O.S., Makushina M.A., Kalashnikov V.S., Lavrova O.Yu. Comparative analysis of mechanical properties of heat-resistant titanium alloy VT46 in cast and forged conditions. *Trudy VIAM*, 2025, no. 9 (151), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-19-34.

### **Введение**

Необходимость в разработке новых сплавов для авиационной отрасли, как правило, диктуется требованиями по повышению удельных прочностных характеристик конструкционных материалов в определенном интервале рабочих температур. Для деталей газотурбинных двигателей, помимо типовых характеристик статической кратковременной прочности, существенное значение имеют характеристики пластичности, вязкости разрушения и чувствительности материала к концентраторам напряжений, которые представляют количественные показатели надежности. При разработке нового материала обязателен учет технологических особенностей изготовления полуфабрикатов, заготовок и деталей. С учетом вышесказанного в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработан новый высокопрочный жаропрочный сплав псевдо- $\alpha$ -класса, получивший марку ВТ46. По уровню легирования элементами, стабилизирующими  $\beta$ -фазу, новый сплав является аналогом серийного сплава марки ВТ20 (полный аналог в КНР – сплав ТА15) [1–5], имея при этом существенные отличия в композиции (химическом составе) и фазовом составе. В отличие от серийных псевдо- $\alpha$ -сплавов (ОТ4, ВТ18У, ВТ20), термическая обработка сплава ВТ46 заключается в обработке на твердый раствор с последующим старением. Эффективное упрочнение посредством термической обработки по режиму двойного отжига, а также уровень прочностных характеристик обеспечивают возможность рассматривать двухфазные жаропрочные титановые сплавы ВТ3-1, ВТ8 и ВТ9 [6–8] как серийные сплавы-аналоги для сплава ВТ46 по области применения. Сплавы ВТ3-1 и ВТ20 применяются не только для изготовления деталей авиационной техники, но и в других отраслях машиностроения, наряду со сплавом ВТ6 [9–15]. Относительная простота технологии изготовления полуфабрикатов до известной степени определяет стабильность механических свойств. Поэтому сплав ВТ46 в виде деформированных полуфабрикатов должен быть интересен машиностроителям для замены менее прочных сплавов, разработанных в 60-х гг. прошлого века. Одна из основных целей данной статьи – помочь заинтересованным специалистам сделать обоснованные выводы о целесообразности замены серийных сплавов на новый с учетом фактических характеристик материала и особенностей технологии изготовления полуфабрикатов и деталей.

При этом сплавы ВТ6 и ВТ20 (как наиболее универсальные) применяются для изготовления заготовок методом центробежного литья [16–18]. Попытки промышленного освоения отливок из двухфазных жаропрочных титановых сплавов ВТ3-1Л, ВТ9Л и ВТ18У [19, 20] в отечественной практике не увенчались успехом, поэтому сплав ВТ20Л остается наиболее жаропрочным литейным титановым сплавом. Развитие технологии изготовления полимерных композиционных материалов наряду с получением опыта эксплуатации деталей из них [21, 22] делают возможным альтернативный выбор в пользу этих материалов для снижения массы конструкций. Однако титановые сплавы и сплавы из легких цветных металлов могут работать при температурах  $>100$  °С.

В данной статье в рамках работ по общей квалификации [23–26] использованы результаты испытаний, полученные на промышленных и опытно-промышленных полуфабрикатах и заготовках – поковках, прутках [27] и отливках из сплава ВТ46, а также результаты приемо-сдаточных испытаний серийных изделий из сплавов ВТ3-1, ВТ8, ВТ9 и ВТ20.

Испытания механических свойств, отдельные металлофизические исследования, а также контроль химического состава сплава ВТ46 проводили в Испытательном центре НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ [28]. Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

### Материалы и методы

В работе исследованы промышленные полуфабрикаты из сплава ВТ46, изготовленные в производственных условиях ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» по полному металлургическому циклу, а также поковки из сплава ВТ46, изготовленные как из слитков собственного производства методом двойного вакуумно-дугового переплава, так и из исходного кованого прутка ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА», имеющего после механической обработки  $\varnothing 150$  мм. В качестве литейной заготовки для изготовления отливок использовали слитки собственного производства после двукратного вакуумно-дугового переплава, а также материал прутка промышленной поставки  $\varnothing 150$  мм. Технология изготовления кованых прутков и штамповок в условиях промышленного предприятия не отличалась от типовой технологической схемы изготовления, применяемой для аналогичных изделий из серийных жаропрочных титановых сплавов. Для изготовления промышленной штамповки из сплава ВТ46 использована серийная оснастка для изготовления штамповок из сплава ВТ3-1. Отливки изготавливали на вакуумно-индукционной плавильно-заливочной установке с водоохлаждаемым тиглем методом центробежной заливки в керамические формы.

Номинальные и фактические химические составы слитков сплава ВТ46, приведенные к структурным эквивалентам по алюминию и молибдену [9], использованные в данной работе, приведены в табл. 1.

Таблица 1

#### Уровень легирования сплава ВТ46, а также серийных титановых сплавов в структурных эквивалентах

Сплав	Полуфабрикат	Вид термической обработки (ТО)	Уровень легирования, %	
			[Al] <sup>ср</sup>	[Mo] <sup>ср</sup>
ВТ46	Пруток (номинальный состав)	Двойной отжиг	8,6	3,21
	Пруток и поковка (фактический состав)	Двойной отжиг (для штамповки, изготовленной с помощью молота, – с охлаждением под вентилятором после первой ступени отжига)	8,29–8,63	3,06–3,21
	Цельнокатаные и кованые кольца сечением 71 и 45 мм соответственно	Двойной отжиг (для цельнокатаного промышленного кольца – с охлаждением под вентилятором после первой ступени отжига)		
ВТ46Л	Отливка (номинальный состав)	Горячее изостатическое прессование (ГИП), двойной отжиг	8,2	3,31
	Отливка (фактический состав)		8,27–8,8	3,19–3,45
ВТ3-1	Поковки и штамповки (номинальный состав)	Изотермический отжиг с охлаждением с переносом в печь	7,5	5,6
ВТ20	Прутки, поковки, штамповки, цельнокатаные кольца (номинальный состав)	Одноступенчатый отжиг	8,05	3,27
ВТ20Л	Отливка (номинальный состав)	Без ТО или неполный отжиг для снятия напряжений	8,25	3,1
ВТ9	Прутки, штамповки, поковки (номинальный состав)	Двойной отжиг	8,0	3,6
ВТ9Л	Отливка (номинальный состав)	Без ТО или неполный отжиг для снятия напряжений	7,8	3,6

Определение механических свойств проводили по стандартным методикам: ГОСТ 94545–78, ГОСТ 9651–84, ГОСТ 10145–84, ГОСТ 1497–84, ГОСТ 1497–2023.

Внешний вид отдельных промышленных и опытно-промышленных полуфабрикатов из сплава ВТ46 (ВТ46Л) приведен на рис. 1.



Рис. 1. Полуфабрикаты из сплава ВТ46 (ВТ46Л): *а* – штамповка, изготовленная с помощью молота, с габаритными размерами 343×263×92 мм и массой 14 кг; *б* – штамповка, изготовленная на изотермическом прессе, с габаритными размерами  $\varnothing 260 \times 150$  мм, максимальным сечением под термическую обработку 96 мм и массой 25 кг в обточенном состоянии; *в* – цельнокатаные кольца (размеры одного кольца – диаметры  $D_{\text{нар}} = 945$  мм,  $D_{\text{вн}} = 802$  мм, высота стенки  $H = 100$  мм, масса 86,5 кг); *г* – промышленные кованые и катаные прутки диаметром 35; 43 и 150 мм; *д* – опытная отливка для определения механических свойств диаметром 23 мм с фрагментом прибыли, после литья

### Результаты и обсуждение

На рис. 2–5 представлены микроструктуры всех исследованных полуфабрикатов (прутка, поковки, кольца и отливки) из сплава ВТ46 (ВТ46Л).

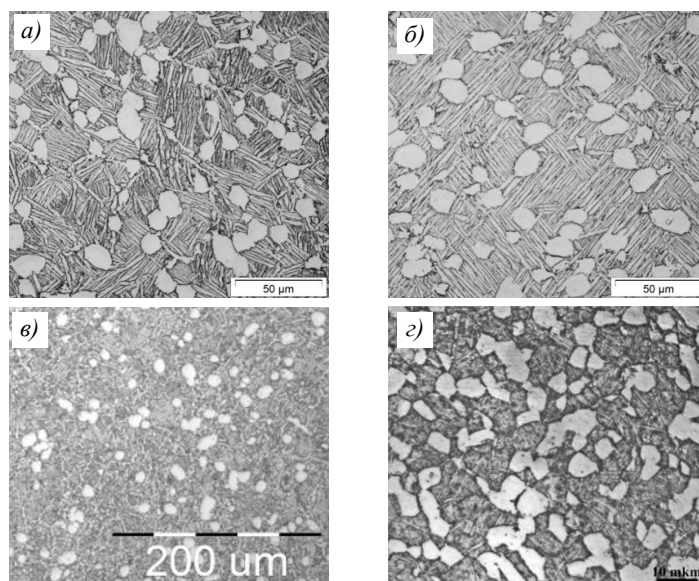


Рис. 2. Микроструктуры прутка из сплава ВТ46 в отожженном состоянии (оптическая микроскопия) диаметром 150 мм в поперечном (*а*) и продольном (*б*) направлениях, а также в поперечном направлении диаметром 35 (*в*) и 43 мм (*г*)

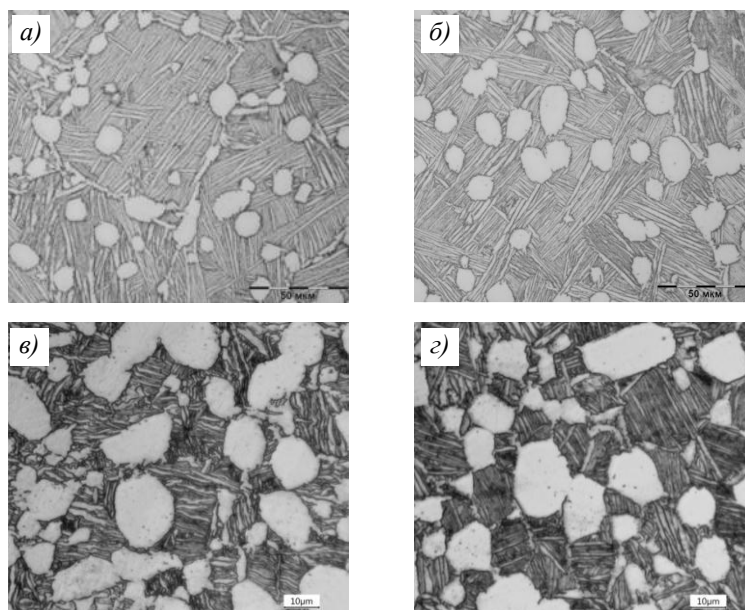


Рис. 3. Типичные микроструктуры полуфабрикатов из сплава ВТ46 (оптическая микроскопия): *a* – промышленная штамповка, изготовленная с помощью молота; *б* – промышленное цельнокатаное кольцо; *в* – изотермическая штамповка центробежного колеса; *г* – кольцевая поковка сечением 45 мм

Микроструктура всех исследованных деформированных полуфабрикатов из сплава ВТ46 – глобулярно-пластинчатая, типичная для деформации и термической обработки при температурах двухфазной области. Различия в количественных характеристиках микроструктуры (размер частиц первичной  $\alpha$ -фазы и их объемная доля, толщина пластин вторичной  $\alpha$ -фазы, размеры колоний вторичной  $\alpha$ -фазы, размеры условного  $\beta$ -зерна) определяются фактическими условиями изготовления – технологией горячей деформации, режимом термической обработки и фактическими условиями охлаждения после первой ступени отжига.

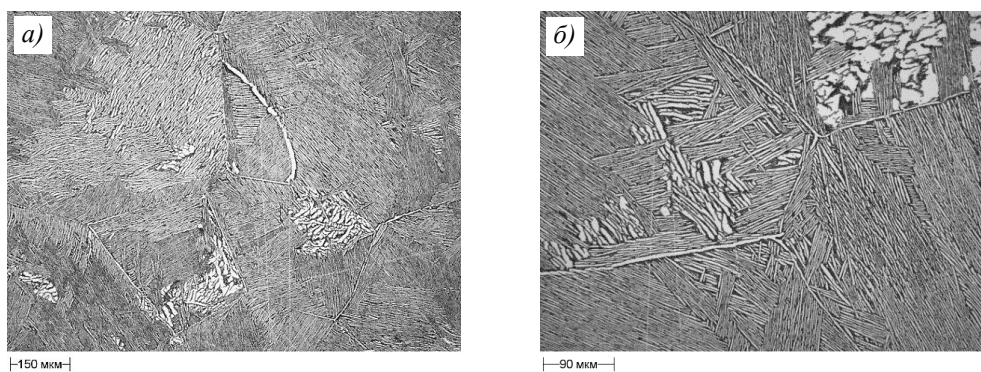


Рис. 4. Микроструктура отливки из сплава ВТ46Л после горячего изостатического прессования и двойного отжига при различных малых увеличениях (оптическая микроскопия)

Изображения микроструктур сплава ВТ46Л в различных состояниях при больших увеличениях, полученные методом растровой электронной микроскопии, приведены на рис. 5.

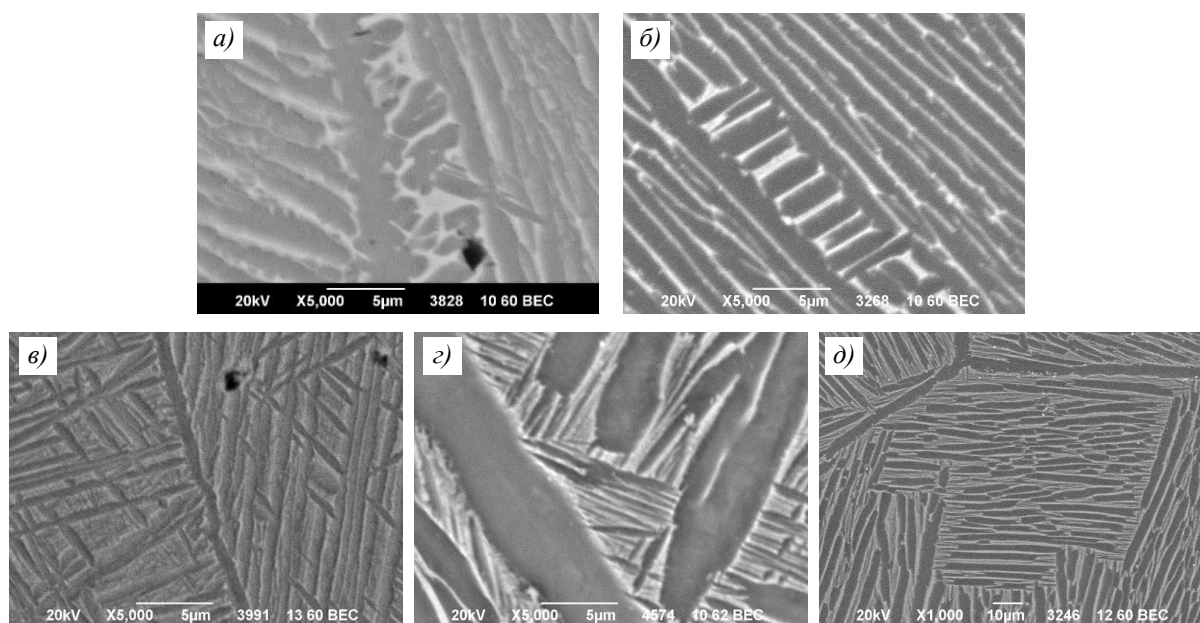


Рис. 5. Микроструктуры отливки из сплава ВТ46Л (РЭМ) при большом увеличении в литом состоянии (а), в литом состоянии + горячее изостатическое прессование (ГИП) + старение (б), в литом состоянии + высокотемпературная ступень отжига (в), в литом состоянии + ГИП + двойной отжиг (з, д)

На фотографиях микроструктуры отливок из сплава ВТ46Л при малых увеличениях видно, что структура крупнозернистая, границы зерен четко различимы, внутризеренная морфология пластинчатая. Внутри каждой колонии пластины имеют одинаковую геометрическую ориентировку, сами колонии различно ориентированы по отношению друг к другу. Толщина первичной  $\alpha$ -фазы пластинчатой морфологии (толщина пластин) в литом состоянии составляет около 2–3 мкм (рис. 5, а). Такая структура является типичной для отливок из традиционных (неинтерметаллидных) титановых сплавов [29]. На рис. 5, а, в видна микропористость материала отливки, которая устраняется путем горячего изостатического прессования (ГИП) (рис. 5, б). Скорости охлаждения отливок после ГИП не позволяют получить в сплаве ВТ46Л бипластинчатую микроструктуру, так как газостат не оборудован системой циркуляции инертного газа. Увеличение температуры ГИП до типичных температур обработки на твердый раствор приводит к ухудшению прочностных характеристик материала из-за увеличения размеров структурных составляющих. Снижение уровня прочностных характеристик в результате превращения при нагреве до верхней части двухфазной области  $\alpha + \beta \rightarrow \beta + \alpha$  и охлаждении  $\beta + \alpha \rightarrow \alpha + \beta$  из-за медленных скоростей охлаждения связано также с перераспределением легирующих элементов внедрения (Si, C). Поэтому в производственных условиях НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ лучшие результаты показывает ГИП при промежуточных температурах, соответствующих температурному интервалу содержания  $\beta$ -фазы 20–50 %. Следует отметить, что посредством ГИП обеспечивается протекание частичной рекристаллизации пластин  $\alpha$ -фазы, что хорошо видно при сравнении литого и литого + отожженного состояний (рис. 5, а, в) с состоянием после ГИП и термической обработки (рис. 5, з, д).

На рис. 6 представлены зависимости изменения характеристик механических свойств при растяжении от температуры испытаний для исследованных полуфабрикатов из сплава ВТ46 (ВТ46Л).

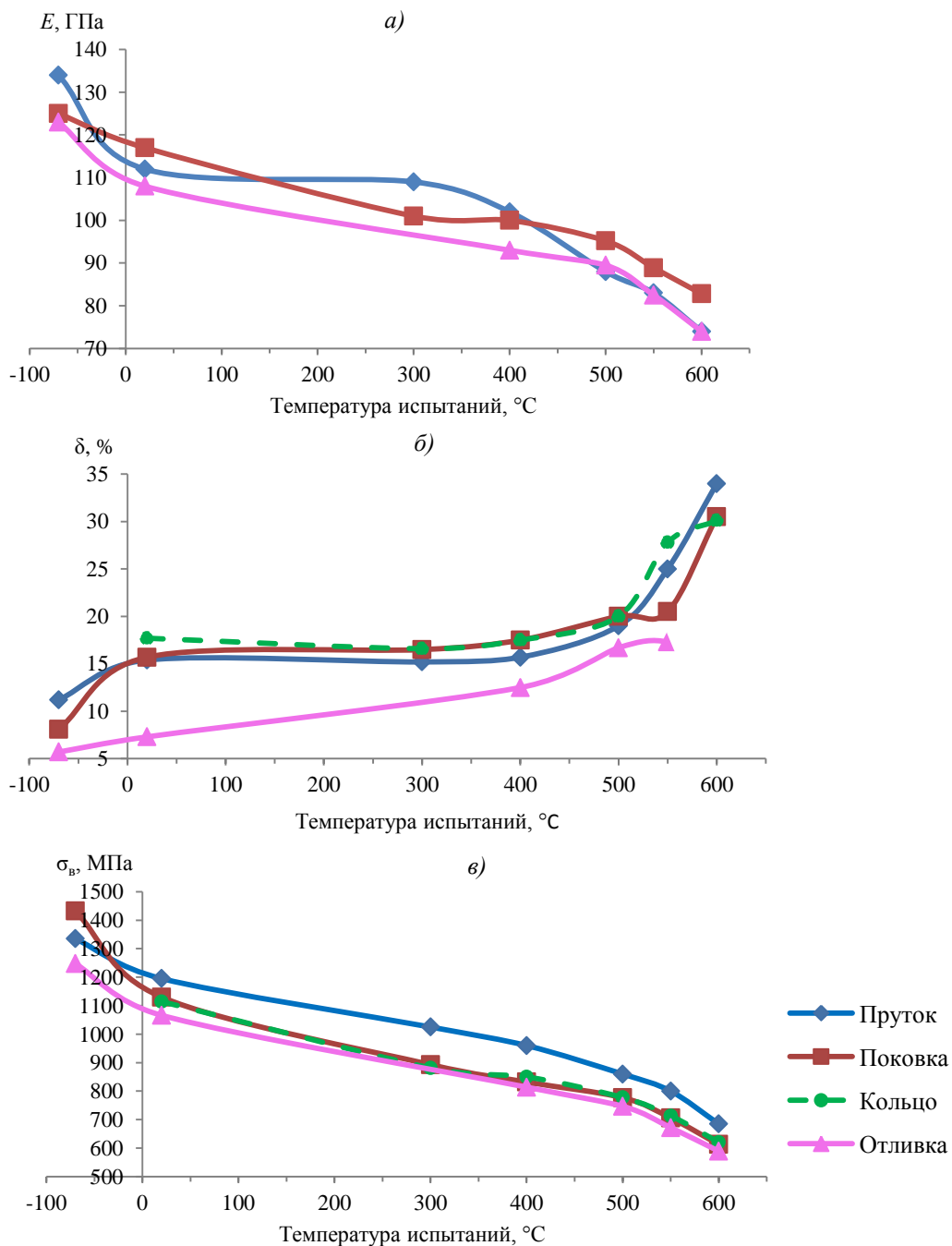


Рис. 6. Модуль упругости (а), относительное удлинение (б) и предел кратковременной прочности (в) полуфабрикатов из сплава ВТ46 (ВТ46Л) в зависимости от температуры испытаний в диапазоне от  $-70$  до  $+600$  °C

Полуфабрикаты из сплава ВТ46 с наиболее мелкозернистой структурой (рис. 6, пруток) демонстрируют преимущество по кратковременной прочности и пластичности материала. При этом тенденция к снижению модуля упругости с ростом температуры для прутков выявляется при несколько меньших температурах испытаний.

Из приведенных данных видно, что отливки из сплава ВТ46Л несколько уступают деформированным полуфабрикатам по прочностным свойствам (рис. 6, а–в). Такая ситуация общеизвестна и обусловлена особенностями технологий изготовления: при многократной деформации зерно измельчается, создавая больше межзеренных

границ, препятствующих движению дислокаций и увеличивающих прочностные свойства. При литье же структура после кристаллизации остается крупнозернистой, размер зерен в основном зависит только от размера сечения самой отливки. Тем не менее исследования и разработка литейных сплавов являются важными направлениями современного материаловедения ввиду ряда преимуществ такой технологии, основным из которых является меньшая стоимость за счет увеличения коэффициента использования металла, уменьшения трудозатрат ввиду отсутствия многоступенчатых операций деформации, а также за счет возможности изготовления гораздо более сложнопрофильных полуфабрикатов, требующих минимальной механической обработки.

Сравнение длительной прочности сплавов ВТ46 (ВТ46Л) со сплавами ВТ9 (ВТ9Л) и ВТ20 (ВТ20Л) за 100 ч при температурах испытаний 500 и 550 °С иллюстрируют соответственно рис. 7, а, б.

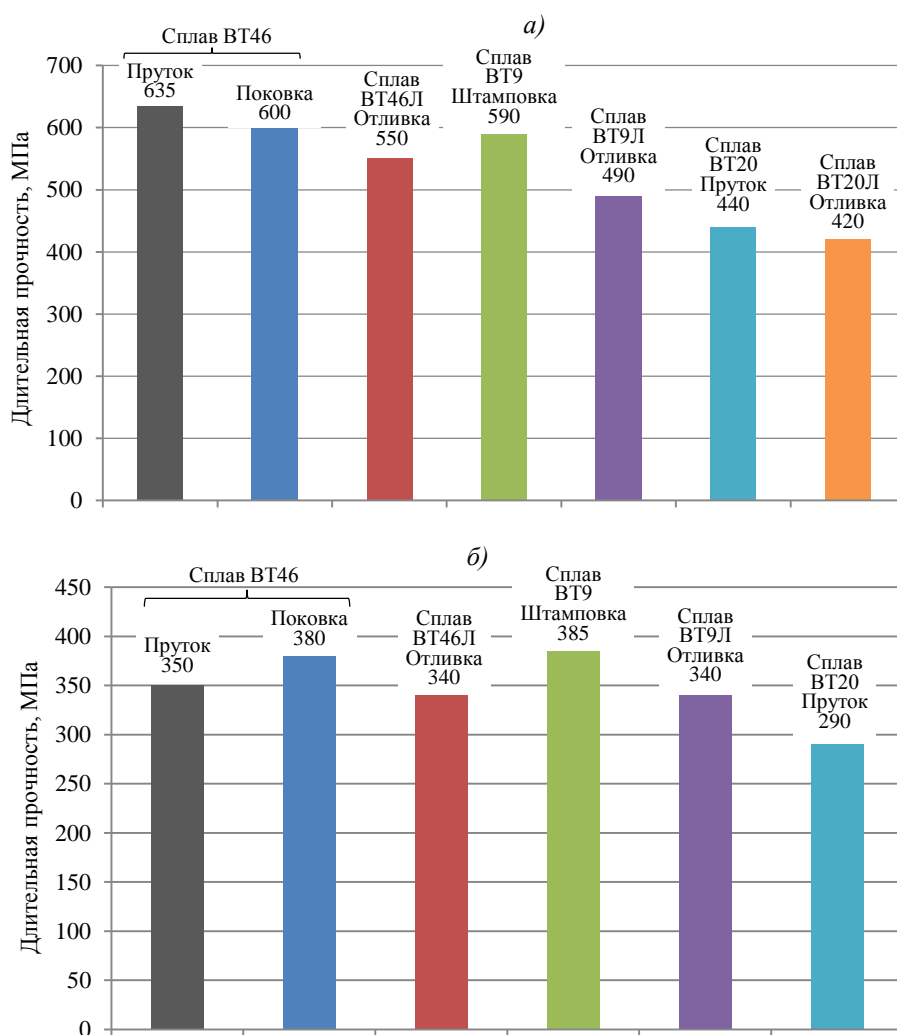


Рис. 7. Длительная прочность жаропрочных титановых сплавов при температурах 500 (а) и 550 °С (б) за 100 ч (средние значения)

Преимущество в прочностных характеристиках прутков из сплава ВТ46 перед другими полуфабрикатами объясняется сохранением преимущества в длительной прочности за 100 ч при температуре испытаний 500 °С (рис. 6, б, в). Отливки из сплава ВТ46Л по длительной прочности при 500 °С занимают промежуточное положение

между штамповками и отливками из сплава ВТ9 (ВТ9Л). При температуре испытаний 550 °С – ситуация изменяется, длительная прочность материалов с более крупнозернистой структурой больше, чем у других полуфабрикатов. По уровню длительной прочности при данной температуре поковки и штамповки из сплава ВТ46 сопоставимы с уровнем аналогичной характеристики для двухфазного жаропрочного титанового сплава ВТ9. Длительная прочность отливок из сплавов ВТ46Л и ВТ9Л находится на одном уровне. Отметим, что наиболее жаропрочный титановый сплав, применяемый для изготовления отливок, марки ВТ20Л – значительно уступает по прочностным и жаропрочным характеристикам сплаву ВТ46Л.

Практическое опробование сплава ВТ46 при изготовлении деформируемых полуфабрикатов (кованых и катаных прутков различного сортамента, поволоков и штамповок, изготовленных на молоте и прессе, цельнокатаных колец), а также отливок показало высокую технологичность материала и стабильность механических свойств в отожженном состоянии. Принципы сочетания твердорастворного и дисперсионного упрочнения, заложенные при разработке сплава, эффективно работают в случае отливок с применением ГИП и термической обработки по режиму двойного отжига. Особенностью термической обработки отливок из сплава ВТ46Л (по сравнению с прутками и штамповками из сплава ВТ46) является более низкая температура первой ступени отжига и более высокая – на второй ступени (рис. 8).

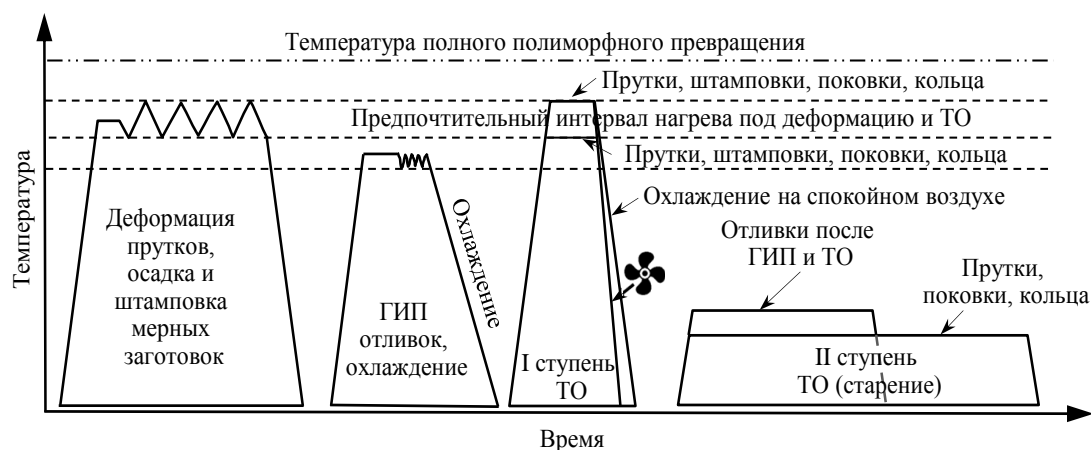


Рис. 8. Схема температурных областей изготовления и термической обработки (ТО) полуфабрикатов из сплава ВТ46 (ГИП – горячее изостатическое прессование)

При сравнении свойств отливок из сплава ВТ46Л с серийным литейным титановым сплавом ВТ20Л и сплавом ВТ9Л, являющимися наиболее жаропрочными литейными титановыми сплавами, становится очевидным преимущество первого (рис. 7, а). Следует сравнить также максимальную рабочую температуру – у сплавов ВТ20Л и ВТ9Л она составляет 500 °С, у сплава ВТ46Л: 550 °С, аналогично сплаву ВТ9Л. Технологические свойства (жидкотекучесть и усадка) для сплава ВТ46Л находятся приблизительно на одном уровне с другими литейными титановыми сплавами (ВТ20Л, ВТ40Л). Отметим, что более сложная композиция сплава ВТ46 (ВТ46Л) обеспечивает большую дисперсность структурных составляющих, снижение размера зерна в отливках (рис. 9) при кристаллизации.

Сравнение зависимости кратковременной прочности от температуры испытаний литейных титановых сплавов иллюстрирует рис. 10.

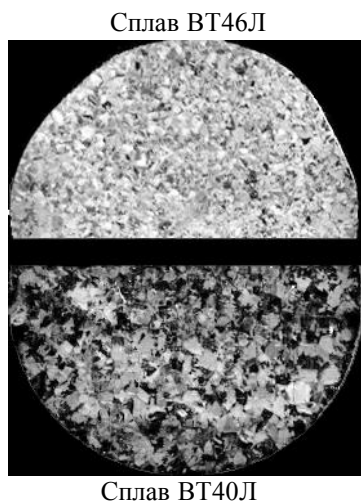


Рис. 9. Макроструктура ( $\times 2$ ) отливок из сплавов ВТ46Л и ВТ40Л

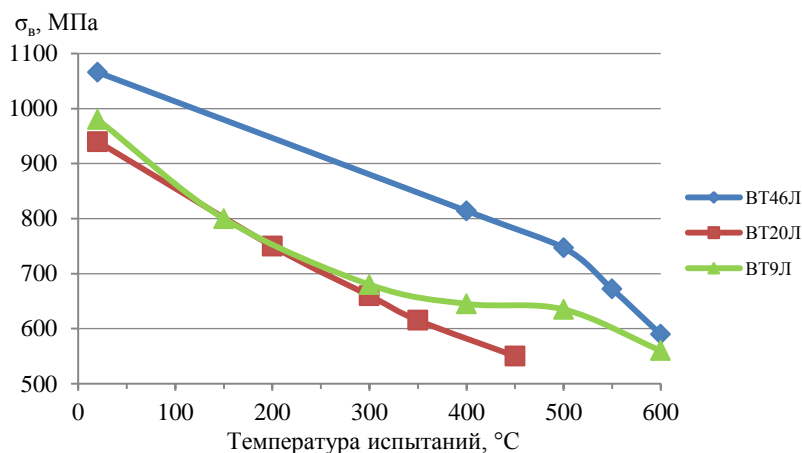


Рис. 10. Предел кратковременной прочности отливок из сплавов ВТ46Л, ВТ20Л и ВТ9Л в зависимости от температуры

Исходя из уровня прочностных свойств, сплав ВТ46Л можно было бы сравнить со сплавом ВТ40Л ( $\sigma_b \geq 1030$  МПа,  $\sigma_{0,2} \geq 900$  МПа,  $\delta \geq 5$  %) [30] – эти сплавы действительно схожи по некоторым параметрам. Например, и в том, и в другом случае в составе в качестве основных легирующих элементов присутствуют кислород и углерод в небольших количествах. Как элементы внедрения они позволяют повысить значения прочностных характеристик и уменьшить ликвацию. Однако сплав ВТ46Л имеет гораздо более высокую рабочую температуру – до 550 °С, в то время как сплав ВТ40Л работоспособен при температуре до 300 °С.

В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработан полный цикл производства отливок из сплава ВТ46Л – начиная от выплавки слитков сплава (равномерных по химическому составу) и до изготовления отливок методом вакуумно-индукционной плавки в печи с водоохлаждаемым тиглем с центробежной заливкой с последующей постобработкой. При разработке технологии изготовления учтены все технологические факторы, влияющие на качество конечной отливки, в том числе и склонность к образованию внутренних дефектов усадочного характера. Для устранения таких дефектов существуют следующие способы: тщательный подбор и разработка конструкции литниково-питающей системы, установка прибылей в местах тепловых узлов для «вытягивания» усадочных пор, а также применение ГИП. Литниково-питающая система для каждого наименования

отливок и для каждой печи будет разной, а ГИП – процесс более универсальный, поэтому в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработаны рекомендации к режимам газостатирования, тщательно подобранные и обеспечивающие диффузионное сращивание усадочных пор. Отметим, что при освоении изготовления отливок на машиностроительных предприятиях, оснащенных газостатами с охлаждением «холодным» инертным газом, возможно совмещение операции ГИП с высокотемпературной ступенью термической обработки. Сниженное в сплаве ВТ46 (ВТ46Л) содержание алюминия, по сравнению со сплавом ВТ20 (ВТ20Л), позволяет проводить операцию ГИП при меньших температурах. Для отливок снижение температуры первой ступени отжига необходимо с точки зрения снижения рисков их коробления. Для снижения толщины дефектного слоя продолжительность выдержки отливок в атмосферной печи должна соответствовать минимальным значениям действующих рекомендаций при термической обработке деформированных полуфабрикатов с учетом величины максимального сечения изделия.

Оценивая зарубежный опыт применения деформируемых полуфабрикатов и отливок из жаропрочных титановых сплавов, нельзя не упомянуть сплав Ti6242 [31, 32], наиболее близким серийным отечественным аналогом которого является сплав ВТ20. В статье [33] сообщается об освоении изготовления отливок сложной геометрической формы в виде объемной фермы (рис. 11).

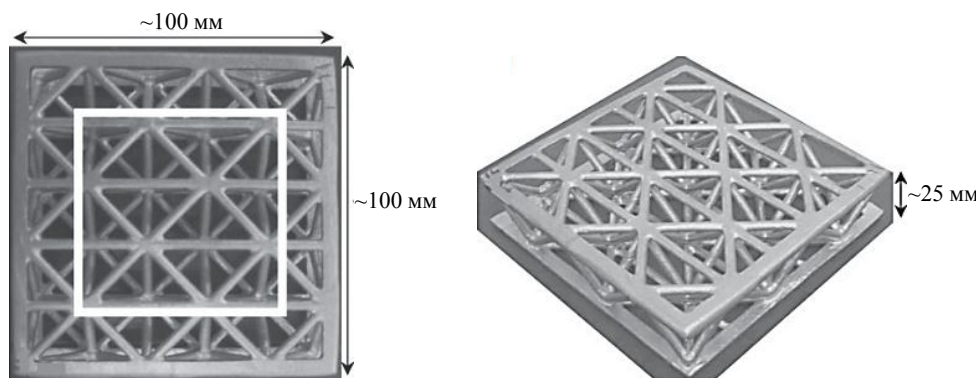


Рис. 11. Отливка из сплава Ti6242

Данные отливки проходят операцию ГИП при температуре 900 °С в течение 2 ч при давлении 103 МПа. В случае необходимости дефекты устраняются подваркой, затем заготовку подвергают отжигу при температуре 730 °С в течение 2 ч, охлаждая с печью. Сообщается, что по сравнению с изготовлением данной заготовки методами аддитивного производства отливка обладает большей прочностью материала внутренних стоек фермы и сниженной стоимостью. Аналогичные отливки ранее изготавливали из сплава Ti6-4. Для оценки работоспособности испытание при сжатии проводили непосредственно на изделии при комнатной температуре, а также при температурах 315 и 482 °С. Отливки из сплава Ti6242 применяются для изготовления корпуса компрессора двигателя Т406 (Rolls-Royce) [34] в состоянии после ГИП и старения. Исследована возможность полноценной термической обработки отливок после ГИП, отмечена важность обеспечения определенных скоростей охлаждения заготовок после обработки на твердый раствор. После термической обработки с регламентированными скоростями охлаждения (высокой – около 38 °С/мин и низкой – не более 4,5 °С/мин) на отливке из сплава Ti6242 после ГИП и термической обработки получены следующие значения свойств:  $\sigma_B^{20^\circ} = 965\text{--}972$  МПа,  $\delta = 8\text{--}17$  %,  $\psi = 10\text{--}22$  %,  $\sigma_B^{400^\circ} = 655\text{--}607$  МПа. В статье [34] также отмечается, что проведение отдельной операции термической обработки отливок позволяет частично нивелировать производственные факторы, связанные с литейным производством. На отливках из сплава ВТ46Л получен значительно более высокий уровень прочностных

характеристик при более низких характеристиках пластичности. Аналогично сплаву Ti6242 для отливок из сплава ВТ46Л возможен индивидуальный подход с корректировкой расчетного состава литой заготовки, а также режимов термической обработки с целью повышения уровня тех или иных механических свойств. Сплав ВТ46 – свариваемый. В условиях НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ опробовано получение сварных соединений методом ручной аргоно-дуговой сварки с применением присадочной проволоки из сплава ВТ20-2св, а также заготовок из листа сплава ВТ46 толщиной 1,0 мм.

С учетом вышесказанного можно рекомендовать деформируемые полуфабрикаты отливок из сплава ВТ46 (ВТ46Л) для опробования в образцах перспективной авиационной техники для деталей, работающих при температуре до 550 °С. Сплав марки ВТ46 рекомендуется для изготовления отдельных роторных и статорных деталей и узлов компрессора газотурбинных двигателей, работающих при температурах до 550 °С, деталей авиационной техники и различных изделий других отраслей промышленности.

### Заключения

Проведено комплексное исследование полуфабрикатов из титанового сплава ВТ46 и его литейной модификации ВТ46Л. Оценена микроструктура, прочностные и пластические свойства при различных температурах. Установлено, что прочность отливок из сплава ВТ46Л несколько уступает прочности деформированных полуфабрикатов из сплава ВТ46, что обусловлено технологией изготовления.

Положительный практический опыт изготовления различных полуфабрикатов – кованных и катаных прутков, поковок кованных и штампованных из сплава ВТ46 – показывает стабильность получения высокого уровня прочностных характеристик. Максимальный уровень кратковременной прочности и усталостной долговечности в интервале рабочих температур, полученный на прутках диаметром до 45 мм, свидетельствует о потенциальной возможности дополнительного повышения этих характеристик для более крупных деформированных полуфабрикатов за счет применения более сложных схем деформации и увеличения суммарной деформации при температурах двухфазной области. Исследование материала штамповки центробежного колеса с сечением под термическую обработку ~100 мм, отожженного с охлаждением на спокойном воздухе, показало достаточную прокаливаемость сплава ВТ46 для обеспечения уровня прочности  $\sigma_B^{20^\circ} \geq 1060$  МПа. Применение ускоренного охлаждения на воздухе позволяет увеличить гарантированный и фактический уровень прочности до  $\sigma_B^{20^\circ} = 1080\text{--}1220$  МПа при сохранении высоких характеристик пластичности. Таким образом, сплав ВТ46 относительно просто упрочняется путем обдува воздухом при охлаждении с температуры обработки на твердый раствор, что позволяет получать прочность материала на уровне высокопрочных двухфазных титановых сплавов.

Проведен сравнительный анализ свойств отливок из сплава ВТ46Л со свойствами отливок из других литейных титановых сплавов – аналогами по применению. Установлено, что прочностные свойства сплава ВТ46Л превышают свойства литейных жаропрочных титановых сплавов ВТ9Л и ВТ20Л.

Сообщается о разработке полного цикла производства отливок из сплава ВТ46Л в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ: от производства слитков сплава до выплавки отливок и их постобработки.

Таким образом, можно сделать вывод о перспективности внедрения отливок из сплава ВТ46Л наравне с деформированными полуфабрикатами из сплава ВТ46 в конструкцию современных образцов авиационной техники.

### Список источников

1. Moiseyev V.N. Titanium Alloys: Russian Aircraft and Aerospace Applications. New York: CRC Press, 2006. 214 p.

2. Sun Z., Wu H., Ma X. et al. Dependence of Microstructure on Solution and Aging Treatment for Near- $\beta$  Forged TA15 Ti-Alloy // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2016. Vol. 25 (10). P. 4549–4560. DOI: 10.1007/s11665-016-2282-2.
3. Wu H., Sun Z., Cao J., Yin Z. Microstructure and Mechanical Behavior of Heat-Treated and Thermomechanically Processed TA15 Ti Alloy Composites // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2019. Vol. 28 (2). P. 788–799. DOI: 10.1007/s11665-019-3881-5.
4. Sun Z., Wang X., Zhang J., Yang H. Prediction and control of equiaxed  $\alpha$  in near- $\beta$  forging of TA15 Ti-alloy based on BP neural network: For purpose of tri-modal microstructure // *Materials Science & Engineering*. 2014. Vol. 591. P. 18–25. DOI: 10.1016/j.msea.2013.10.080.
5. Zhu S., Yang H., Guo L.G., Fan X.G. Effect of cooling rate on microstructure evolution during  $\alpha/\beta$  heat treatment of TA15 titanium alloy // *Materials characterization*. 2012. Vol. 70. P. 101–110. DOI: 10.1016/j.matchar.2012.05.009.
6. Солонина О.П., Глазунов С.Г. Современные жаропрочные титановые сплавы и перспективы их применения в двигателях. М.: Металлургия, 1974. 448 с.
7. Яшин М.С., Капитаненко Д.В. Исследование структуры и свойств сплава ВТ3-1 применительно к технологии получения штамповок дисков и лопаток // *Труды ВИАМ*. 2023. № 8 (126). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 22.07.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-52-63.
8. Яковлев М.М., Яруллин Р.Р., Шлянников В.Н. Параметры сопротивления разрушению имитационной модели диска компрессора // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Сер.: Механика*. 2020. № 3. С. 98–107. DOI: 10.15593/perm.mech/2020.3.10.
9. Петров А.П., Беспалов А.В., Соколов А.В., Шленский А.Г. Горячее гидростатическое выдавливание титановых заготовок в производстве компрессорных лопаток газотурбинных двигателей // *Технология легких сплавов*. 2022. № 1. С. 58–66. DOI: 10.24412/0321-4664-2022-1-58-66.
10. Братан С.М., Рошупкин С.И., Часовитина А.С., Гупта К. Влияние на вероятность удаления материала относительных вибраций абразивного инструмента и заготовки при чистовом шлифовании // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2022. Т. 24. № 1. С. 33–47. DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.1-33-47.
11. Егорова Ю.Б., Давыденко Л.В., Белова С.Б. Статистическое сопоставление длительной и кратковременной прочности титановых сплавов при температурах эксплуатации // *Технология легких сплавов*. 2024. № 1. С. 13–22. DOI: 10.24412/0321-4664-2024-1-13-22.
12. Ломакин Е.В., Брагов А.М., Константинов А.Ю. и др. Моделирование поведения титанового сплава ВТ20 при ударном взаимодействии // *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*. 2011. № 1. С. 129–132.
13. Гадалов В.Н., Кутепов С.Н., Филонович А.В. и др. Мониторинг численного моделирования процесса поверхностно-упрочняющей обработки титановых сплавов ВТ20 и ОТ4 // *Известия ТулГУ. Сер.: Технические науки*. 2023. № 9. С. 354–358. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-9-349-350.
14. Солер Я.И., Ши М. Повышение эффективности использования карбидкремниевых абразивных кругов при плоском шлифовании титанового сплава ВТ20 // *Машиностроение и машиноведение*. 2016. № 8 (115). С. 43–55.
15. Зеньков Е.В. Экспериментальные исследования прочности моделей шатунов автомобильных двигателей из титанового сплава ВТ20 // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2021. № 11 (113). Ч. 1. С. 23–28. DOI: 10.23670/IRJ.2021.113.11.006.
16. Антипин Н.А., Гецов Л.Б., Гнеденков Е.В. и др. Прочность и трещиностойкость колес центробежных компрессоров // *Газовая промышленность*. 2017. № 11 (760). С. 120–128.
17. Тисарев А.Ю., Василевич Н.М. Исследование влияния неосесимметричных элементов воздушной системы двигателя на параметры потока, температурные поля и деформации деталей ГТД // *Вестник СГАУ*. 2012. № 3 (34). С. 279–284.
18. Макушина М.А., Кочетков А.С., Ночовная Н.А. Литейные титановые сплавы для авиационной техники (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2021. № 7 (101). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 22.07.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-7-39-47.
19. Кишалов А.Е., Липатов В.Д. Автоматизированное проектирование конструкции основных узлов ТРДДФСМ на примере двигателя семейства АЛ-31Ф // *Вестник УГАТУ*. 2020. Т. 24. № 4 (90). С. 48–56.

20. Авиационные материалы: справочник в 13 т. / под ред. Е.Н. Каблова. 7-е изд., доп. и перераб. М.: ВИАМ, 2010. Т. 6: Титановые сплавы. 95 с.
21. Гуняева А.Г., Курносоев А.О., Славин А.В. Опыт применения полимерных композиционных материалов разработки НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в двигательных установках для самолетов гражданского назначения // Авиационные материалы и технологии. 2024. № 4 (77). Ст. 06. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 28.07.2025). DOI: 10.18557/2713-0193-2024-0-4-82-94.
22. Андриюшкин А.Ю., Комаров К.А., Гуманенко Я.Д. Влияние рабочей температуры на выбор материала оптимальной конструкции силовой стойки летательного аппарата // Аэрокосмическая техника и технологии. 2024. Т. 2. № 4. С. 68–79. DOI: 10.52467/2949-401X-2024-2-4-68-79.
23. Калашников В.С., Решетило Л.П., Чучман О.В., Наприенко С.А. Характеристики прочности и выносливости прутков и штамповок лопаток из серийных жаропрочных титановых сплавов и нового титанового сплава псевдо- $\alpha$ -класса // Труды ВИАМ. 2022. № 2 (108). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.07.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-13-31.
24. Каблов Е.Н. Материалы и технологии ВИАМ для «Авиадвигателя» // Пермские авиационные двигатели. 2014. № 31. С. 43–47.
25. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 7–17.
26. Кашапов О.С., Решетило Л.П., Калашников В.С., Павлова Т.В. О влиянии скоростей охлаждения на микроструктуру и свойства жаропрочного титанового псевдо-альфа-сплава при термической обработке на твердый раствор с охлаждением на воздухе // Металлы. 2021. № 6. С. 46–61.
27. Кашапов О.С., Павлова Т.В., Калашников В.С., Кондратьева А.Р. Исследование влияния содержания легирующих элементов на свойства высокопрочного жаропрочного псевдо- $\alpha$ -сплава ВТ46 // Труды ВИАМ. 2016. № 9 (45). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.07.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-9-6-6.
28. Карачевцев Ф.Н., Алексеев А.В., Летов А.Ф., Дворецков Р.М. Плазменные методы анализа элементного химического состава никелевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 5. С. 483–497. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-483-497.
29. Панин П.В., Ночовная Н.А., Каблов Д.Е., Алексеев Е.Б., Ширяев А.А., Новак А.В. Практическое руководство по металлографии сплавов на основе титана и его интерметаллидов: учеб. пособие / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2020. 200 с.
30. Макушина М.А., Кочетков А.С., Виноградов И.Д. Влияние различных режимов горячего изостатического прессования и термической обработки на структуру и свойства отливок из сплава ВТ40Л // Труды ВИАМ. 2023. № 10 (128). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 22.07.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-10-24-34.
31. Rajan S., Wanjara P., Gholipour J., Kabir A. Joining of Dissimilar Alloys Ti-6Al-4V and Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.1Si Using Linear Friction Welding // Materials. 2020. No. 13. P. 3664–3689. DOI: 10.3390/ma13173664/.
32. Kim Y., Jeong H., Park J. et al. Optimizing process parameters for hot forging of Ti-6242 alloy: A machine learning and FEM simulation approach // Journal of Materials Research and Technology. 2023. No. 27. P. 8228–8243. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.11.193.
33. Li Q., Chen E., Bice D., Dunand D. Mechanical Properties of Cast Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo Lattice Block Structures // Advanced engineering materials. 2008. No. 10. P. 939–942.
34. Bashir S., Thomas M.C. Creep and high temperature low cycle fatigue of cast Ti-6Al-2Mo-4Zr-2Sn. Titanium '92 // Science and Technology. The Minerals, Metals and Materials Society, 1993. P. 319–326.

### References

1. Moiseyev V.N. *Titanium Alloys: Russian Aircraft and Aerospace Applications*. New York: CRC Press, 2006, 214 p.
2. Sun Z., Wu H., Ma X. et al. Dependence of Microstructure on Solution and Aging Treatment for Near-b Forged TA15 Ti-Alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2016, vol. 25 (10), pp. 4549–4560. DOI: 10.1007/s11665-016-2282-2.

3. Wu H., Sun Z., Cao J., Yin Z. Microstructure and Mechanical Behavior of Heat-Treated and Thermomechanically Processed TA15 Ti Alloy Composites. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2019, vol. 28 (2), pp. 788–799. DOI: 10.1007/s11665-019-3881-5.
4. Sun Z., Wang X., Zhang J., Yang H. Prediction and control of equiaxed  $\alpha$  in near- $\beta$  forging of TA15 Ti-alloy based on BP neural network: For purpose of tri-modal microstructure. *Materials Science & Engineering*, 2014, vol. 591, pp. 18–25. DOI: 10.1016/j.msea.2013.10.080.
5. Zhu S., Yang H., Guo L.G., Fan X.G. Effect of cooling rate on microstructure evolution during  $\alpha/\beta$  heat treatment of TA15 titanium alloy. *Materials characterization*, 2012, vol. 70, pp. 101–110. DOI: 10.1016/j.matchar.2012.05.009.
6. Solonin O.P., Glazunov S.G. *Modern heat-resistant titanium alloys and prospects for their application in engines*. Moscow: Metallurgiya, 1974, 448 p.
7. 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> (accessed: July 22, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-52-63.
8. Yakovlev M.M., Yarullin R.R., Shlyannikov V.N. Parameters of fracture resistance of a simulation model of a compressor disk. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Ser.: Mekhanika*, 2020, no. 3, pp. 98–107. DOI: 10.15593/perm.mech/2020.3.10.
9. Petrov A.P., Bespalov A.V., Sokolov A.V., Shlensky A.G. Hot hydrostatic extrusion of titanium blanks in the production of compressor blades for gas turbine engines. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2022, no. 1, pp. 58–66. DOI: 10.24412/0321-4664-2022-1-58-66.
10. Bratan S.M., Roshchupkin S.I., Chasovitina A.S., Gupta K. Influence of relative vibrations of the abrasive tool and the workpiece during finish grinding on the probability of material removal. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovaniye, instrumenty)*, 2022, vol. 24, no. 1, pp. 33–47. DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.1-33-47.
11. Egorova Yu.B., Davydenko L.V., Belova S.B. Statistical comparison of long-term and short-term strength of titanium alloys at operating temperatures. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2024, no. 1, pp. 13–22. DOI: 10.24412/0321-4664-2024-1-13-22.
12. Lomakin E.V., Bragov A.M., Konstantinov A.Yu. et al. Modeling the behavior of titanium alloy VT20 under impact interaction. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo*, 2011, no. 1, pp. 129–132.
13. Gadalog V.N., Kutepov S.N., Filonovich A.V. et al. Monitoring of numerical modeling of the process of surface-hardening treatment of titanium alloys VT20 and OT4. *Izvestiya TulGU. Ser.: Tekhnicheskkiye nauki*, 2023, no. 9, pp. 354–358. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-9-349-350.
14. Soler Ya.I., Shi M. Improving the efficiency of using silicon carbide abrasive wheels in surface grinding of titanium alloy VT20. *Mashinostroyeniye i mashinovedeniye*, 2016, no. 8 (115), pp. 43–55.
15. Zenkov E.V. Experimental studies of the strength of models of connecting rods of automobile engines made of titanium alloy VT20. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*, 2021, no. 11 (113), part 1, pp. 23–28. DOI: 10.23670/IRJ.2021.113.11.006.
16. Antipin N.A., Getsov L.B., Gnednikov E.V. et al. Strength and crack resistance of centrifugal compressor wheels. *Gazovaya promyshlennost*, 2017, no. 11 (760), pp. 120–128.
17. Tisarev A.Yu., Vasilevich N.M. Study of the influence of non-axisymmetric elements of the engine air system on flow parameters, temperature fields, and deformations of gas turbine engine parts. *Vestnik SGAU*, 2012, no. 3 (34), pp. 279–284.
18. Makushina M.A., Kochetkov A.S., Nochovnaya N.A. Cast titanium alloys for aviation equipment (review). *Trudy VIAM*, 2021, no. 7 (101), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 22, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-7-39-47.
19. Kishalov A.E., Lipatov V.D. Automated design of the main units of a turboprop engine using the AL-31F engine family as an example. *Vestnik UGATU*, 2020, vol. 24, no. 4 (90), pp. 48–56.
20. *Aviation materials: reference book in 13 vols*. Ed. E.N. Kablov. 7th ed., add. and rev. Moscow: VIAM, 2010, vol. 6: Titanium alloys, 95 p.
21. Gunyaeva A.G., Kurnosov A.O., Slavin A.V. Experience in the use of polymer composite materials developed by NRC «Kurchatov Institute» – VIAM in engines for civil aircraft. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 4 (77), paper no. 06. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: 28.07.2025). DOI: 10.18557/2713-0193-2024-0-4-82-94.

22. Andryushkin A.Yu., Komarov K.A., Gumanenko Ya.D. Influence of operating temperature on the choice of material for the optimal design of the aircraft power strut. *Aerokosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*, 2024, vol. 2, no. 4, pp. 68–79. DOI: 10.52467/2949-401X-2024-2-4-68-79.
23. Kalashnikov V.S., Reshetilo L.P., Chuchman O.V., Naprienko S.A. Strength and reliability of rods and rotor blade stamps made of heat-resistant industrial titanium alloys and modern pseudo- $\alpha$ -titanium alloy. *Trudy VIAM*, 2022, no. 2 (108), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 19, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-13-31.
24. Kablov E.N. Materials and technologies of VIAM for «Aviadvigatel». *Permskie aviatsionnye dvigateli*, 2014, no. 31, pp. 43–47.
25. Kablov E.N. The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period to 2030. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2012, no. S, pp. 7–17.
26. Kashapov O.S., Reshetilo L.P., Kalashnikov V.S., Pavlova T.V. On the influence of cooling rates on the microstructure and properties of heat-resistant titanium pseudo-alpha alloy during solid solution heat treatment with air cooling. *Metally*, 2021, no. 6, pp. 46–61.
27. Kashapov O.S., Pavlova T.V., Kalashnikov V.S., Kondrateva A.R. Research of influence of alloying elements content on properties of high strength near alpha heat resistance titanium alloy VT46. *Trudy VIAM*, 2016, no. 9, paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 28, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-9-6-6.
28. Karachevtsev F.N., Alekseev A.V., Letov A.F., Dvoretsov R.M. Plasma methods of nickel alloys elemental chemical composition analysis. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2017, no. S, pp. 483–497. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-483-497.
29. Panin P.V., Nochovnaya N.A., Kablov D.E., Alekseev E.B., Shiryayev A.A., Novak A.V. *Practical guide to metallography of titanium-based alloys and its intermetallic compounds: a tutorial*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2020, 200 p.
30. Makushina M.A., Kochetkov A.S., Vinogradov I.D. The influence of various modes of hot isostatic pressed and heat treatment on structure and properties of castings from the VT40L alloy. *Trudy VIAM*, 2023, no. 10 (128), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 22, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-10-24-34.
31. Rajan S., Wanjara P., Gholipour J., Kabir A. Joining of Dissimilar Alloys Ti-6Al-4V and Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.1Si Using Linear Friction Welding. *Materials*, 2020, no. 13, pp. 3664–3689. DOI: 10.3390/ma13173664/.
32. Kim Y., Jeong H., Park J. et al. Optimizing process parameters for hot forging of Ti-6242 alloy: A machine learning and FEM simulation approach. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, no. 27, pp. 8228–8243. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.11.193.
33. Li Q., Chen E., Bice D., Dunand D. Mechanical Properties of Cast Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo Lattice Block Structures. *Advanced engineering materials*, 2008, no. 10, pp. 939–942.
34. Bashir S., Thomas M.C. Creep and high temperature low cycle fatigue of cast Ti-6Al-2Mo-4Zr-2Sn. Titanium '92. *Science and Technology*. The Minerals, Metals and Materials Society, 1993, pp. 319–326.

#### Информация об авторах

**Кашапов Олег Салаватович**, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Макушина Марина Александровна**, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Калашников Владимир Сергеевич**, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Лаврова Ольга Юрьевна**, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

#### Information about the authors

**Oleg S. Kashapov**, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Marina A. Makushina**, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Vladimir S. Kalashnikov**, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Olga Yu. Lavrova**, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 21.08.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 28.08.2025.  
The article was submitted 21.08.2025; approved and accepted for publication after reviewing 28.08.2025.