

Научная статья

УДК: 669.295.5:621.785.376

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-10-65-89

ПЕРСПЕКТИВЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ГРУППОВЫХ ЗАГОТОВОК ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ VT41 и VT46 МЕТОДОМ ГОРЯЧЕЙ ДЕФОРМАЦИИ В ИЗОТЕРМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

А.В. Несолонов¹, Т.В. Павлова¹, О.С. Кашапов¹, А.Р. Кондратьева¹, В.С. Калашников¹

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

Аннотация. Рассмотрены промышленно применяемые технологические схемы изготовления рабочих лопаток компрессора из титановых сплавов наиболее востребованных габаритных размеров, конструктивно выполненных с замком «ласточкин хвост». Представлены результаты экспериментальных исследований структуры и механических свойств исходного материала прутков и штамповок (индивидуальных и групповых заготовок) из жаропрочных титановых сплавов марок VT41 и VT46, полученных по различным технологическим схемам. Установлена возможность обеспечения высоких механических характеристик и технико-экономических показателей изготовления рабочих лопаток компрессора высокого давления из сплавов VT41 и VT46 с использованием исходной групповой заготовки.

Ключевые слова: титановые сплавы, лопатки компрессора, механическая обработка, изотермическая штамповка, термическая обработка, механические свойства

Для цитирования: Несолонов А.В., Павлова Т.В., Кашапов О.С., Кондратьева А.Р., Калашников В.С. Перспективы изготовления групповых заготовок лопаток компрессора из жаропрочных титановых сплавов VT41 и VT46 методом горячей деформации в изотермических условиях // Труды ВИАМ. 2026. № 10 (164). С. 65–89. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-10-65-89.

Scientific article

PROSPECTS FOR MANUFACTURING COMPRESSOR BLADE GROUP FORGINGS FROM HEAT-RESISTANT TITANIUM ALLOYS VT41 AND VT46 VIA ISOTHERMAL HOT DEFORMATION

A.V. Nesolenov¹, T.V. Pavlova¹, O.S. Kashapov¹, A.R. Kondratyeva¹, V.S. Kalashnikov¹

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

Abstract. The article examines industrially applicable manufacturing processes for high-pressure compressor blades made of titanium alloys – specifically those with the most widely used dimensions and a «dovetail» root design. The article presents the results of experimental studies on the microstructure and mechanical properties of starting materials – bars and forgings (both individual and group forgings) made from heat-resistant titanium alloys VT41 and VT46, produced via various manufacturing routes. The study demonstrates the feasibility of achieving high mechanical properties and technical-economic indicators for the manufacture of high-pressure compressor blades from VT41 and VT46 alloys using group blanks.

Keywords: titanium alloys, compressor blades, machining, isothermal forging, heat treatment, mechanical properties

For citation: Nesolenov A.V., Pavlova T.V., Kashapov O.S., Kondratyeva A.R., Kalashnikov V.S. Prospects for manufacturing compressor blade group forgings from heat-resistant titanium alloys VT41 and VT46 via isothermal hot deformation. *Trudy VIAM*, 2026, no. 10 (164), pp. 65–89. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-10-65-89.

Введение

Технология и схемы изготовления рабочих лопаток (РЛ) компрессора из титановых сплавов считаются устоявшимися, эффективность их использования подтверждена значительным опытом изготовления и эксплуатации [1, 2]. В качестве консервативных можно охарактеризовать следующие технологии:

- объемная штамповка, механическая обработка с применением многокоординатных фрезерных станков с числовым программным управлением при обработке пера, отделочные операции;

- объемная штамповка, механическая обработка для получения базовых поверхностей, электрохимическая обработка (ЭХО), отделочные операции – так называемый комбинированный метод;

- точная штамповка с припуском $\sim(0,3-0,7)$ мм с последующей механической (преимущественно абразивной) обработкой, отделочные операции.

Как правило, новизну в существующие технологии привносят операции, связанные с отделкой и упрочнением поверхностей пера РЛ. Следует отдельно отметить попытки использования в качестве исходного материала под штамповку РЛ подготовленные заготовки (преимущественно прутковые) с ультрамелкозернистой структурой с целью повышения характеристик сопротивления усталости готовых деталей. Однако данный подход неприемлем к жаропрочным титановым сплавам с рабочей температурой >450 °С, так как уровень термической стабильности, коррозионной стойкости и характеристик надежности материала с ультрамелкозернистой структурой применительно к РЛ в основном меньше, чем у материала с регламентированной мелкозернистой глобулярно-пластинчатой структурой [3–5]. Кроме того, данная технология более дорогостоящая, так как требует дополнительного передела катаных прутков мелкого сорта для получения ультрамелкозернистой структуры, а высокая степень легирования α -фазы в жаропрочных псевдо- α -сплавах типа ВТ18У и ВТ41 снижает и без того невысокую технологичность материала.

Отдельно рассмотрим технологический процесс горячей деформации. Длительное время большие надежды возлагали на широкое внедрение метода изотермической штамповки (ИЗШ). Тенденция использования изотермических условий деформирования такова, что получение штампованных заготовок с малыми припусками неизбежно связано со снижением температуры нагрева заготовок и оснастки, т. е. осуществляется переход от горячей деформации к «теплой». Для жаропрочных титановых сплавов снижение температуры нагрева заготовок и деформации более чем на 50–75 °С относительно температуры полного полиморфного превращения $T_{п.п}$ может приводить к перераспределению кремния в твердых растворах, увеличению его концентрации вдоль межфазных границ с образованием «высокотемпературных» силицидов. Кроме того, интервал температур от 700 до 830 °С соответствует температурной области интенсивного выделения интерметаллидной фазы Ti_3Al , снижающей пластичность, ударную вязкость и приводящей к повышению чувствительности материала к концентраторам напряжений при различных видах нагружения [6, 7]. Некоторым исключением являются сплавы ВТ8М-1 и ВТ46 со сниженным содержанием алюминия и кремния. Существенное снижение температуры деформации и калибровки в общем случае приводит к получению в изделии глобулярной микроструктуры. До начала 2000-х гг. такая микроструктура считалась оптимальной для лопаток, так как обеспечивала наибольшую

выносливость при испытании гладких образцов и лопаток без концентратора напряжений на многоцикловую усталость. Такой подход требует корректировки в сторону повышения ударной вязкости, трещиностойкости и снижения чувствительности к концентраторам напряжений для материала лопаток. Это, в свою очередь, приводит к необходимости получения микроструктур глобулярно-пластинчатого типа, что требует корректировки температурного режима калибровки штамповок (операция калибровки в изотермических условиях для данного метода изготовления совмещается с высокотемпературной ступенью отжига). В данной статье для сплава ВТ46 калибровка проведена по режиму, отличающемуся более высокой температурой нагрева, чем для серийных жаропрочных титановых сплавов.

Наряду с ИЗШ для изготовления штамповок лопаток применяют и другие технологические методы. Наиболее простым и широко распространенным является метод объемной штамповки, предусматривающий последующую термическую обработку полученных штамповок по типовому режиму отжига. Для большинства жаропрочных титановых сплавов в данном случае используют двойной отжиг.

Другой технологический подход основан на применении термомеханической обработки (ТМО), при которой операции калибровки и высокотемпературной ступени отжига совмещают в рамках единого процесса. После выполнения ТМО штамповки подвергают термической обработке по режиму старения. Наибольшую технологическую сложность представляет высокотемпературная ТМО, которая применяется значительно реже других рассмотренных методов. Данный способ предусматривает последовательное выполнение окончательной штамповки и калибровки, после чего закалка в воде осуществляется при одном нагреве, а завершающей операцией является старение.

Спецификой изготовления РЛ является серийность их производства. Поэтому экономические факторы во многом обуславливают выбор той или иной технологической схемы изготовления. В случае проектирования технологии ИЗШ с применением малых припусков стоимость изготовления и ремонта штамповой оснастки вносит значительный вклад в общую себестоимость изделий. Для широкой номенклатуры РЛ из титановых сплавов целесообразно проводить основные операции формообразования на производительном кузнечном оборудовании с применением электроконтактной высадки при фасонировании заготовок, штамповкой на гидровинтовых и кривошипных прессах. Изотермические условия при типовой технологии рационально использовать ограниченно, на отдельных операциях, проводимых при более низких температурах нагрева заготовок. Проведение операций фасонирования заготовок с применением индивидуальной штамповой оснастки – дорогостоящий процесс: в зависимости от габаритов и формы заготовок стойкость штамповой оснастки на операциях молотовой штамповки для мало- и среднегабаритных заготовок может составлять $\sim(800-1200)$ шт. [8], на операциях калибровки на прессе в изотермических условиях достигает $\sim(150-350)$ шт. Причем максимальная стойкость оснастки получена за счет снижения температуры изотермической установки (штампов) на $\sim(100-200)$ °С относительно температуры нагрева заготовок под деформацию. Положительный эффект от изготовления штамповок по такой технологии связан с совмещением операций калибровки с высокотемпературной ступенью отжига, т. е. получением лопаток по схеме ТМО.

В случае сплава ВТ41, работающего при предельных для титановых сплавов температурах (550–600 °С), для обеспечения высокого уровня жаропрочности и сопротивления усталости при повышенных температурах после штамповки необходим двойной отжиг.

К особенностям эксплуатации газотурбинных двигателей относятся износ РЛ и их повреждения от попадания посторонних предметов в тракт. Описанные явления яв-

ляются основными причинами снижения эксплуатационных характеристик и досрочного снятия двигателей [9] с воздушных судов, несмотря на применение пылезащитных устройств [10] и антиэрозионных покрытий РЛ типа (TiZr)N [11–13]. Например, при эксплуатации вертолета Ми-8 в условиях запыленной атмосферы в республике Алжир время работы двигателей до съема по причине эрозионного износа компрессора составило 600 ± 50 ч при межремонтном ресурсе двигателя 1500 ч [14]. Значительный песчано-абразивный износ неизбежен на силовых установках воздушных судов гражданской и военной техники, эксплуатируемых в описанных условиях. Таким образом, РЛ требуют замены при эксплуатации изделий. В этой связи при разработке новой технологии изготовления РЛ основными критериями будут являться экономическая эффективность и производительность при сохранении высокого качества материала и точности изготовления деталей.

Одним из путей снижения себестоимости РЛ является изготовление так называемых групповых заготовок, которое в советское время было освоено на машиностроительных предприятиях путем периодической горячей прокатки заготовок из исходных катаных прутков из двухфазного жаропрочного титанового сплава марки ВТ8 (последовательность технологических переходов приведена на рис. 1). На операции периодической прокатки выполняется задача по перераспределению материала от будущего пера к хвостовику. Заготовки под прокатку нагревают до $900\text{--}930^\circ\text{C}$, максимальное обжатие заготовок по перу составляет 50–60 % (коэффициент вытяжки 2,3–2,6) [15, 16].

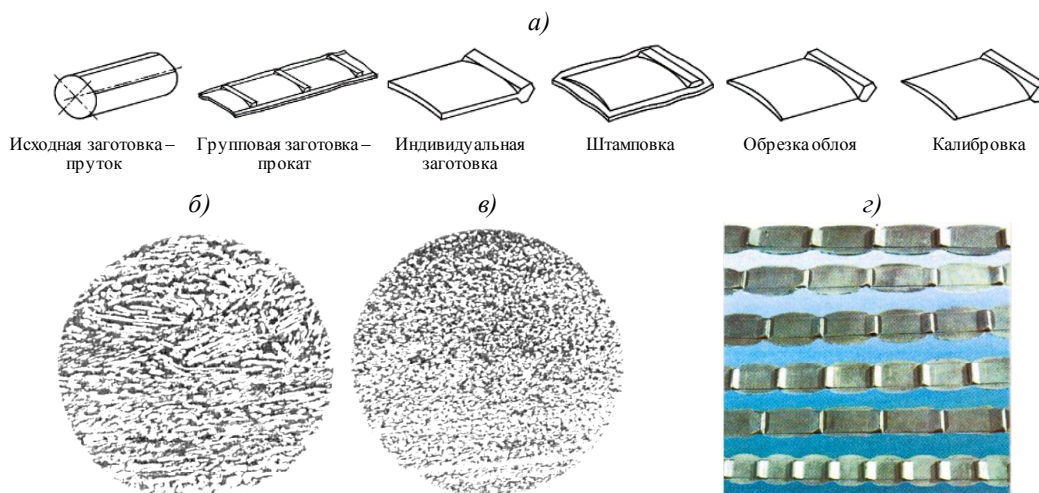


Рис. 1. Последовательность технологических переходов на операциях горячей деформации с использованием групповой заготовки на машиностроительных предприятиях (а), микроструктуры материала периодического проката (б) и групповой заготовки (в), вид полос периодического проката (з)

Отметим, что низкие температуры нагрева под прокатку, а также небольшое сечение заготовки не позволяют применять данную технологию для псевдо- α -сплавов типа ВТ18У, ВТ20 и ВТ41.

В обобщенном виде укрупненные технологические схемы изготовления РЛ из титановых сплавов приведены на рис. 2. Типовая технология изготовления РЛ (комбинированная, с применением индивидуальных штампованных заготовок из исходных прутков мелкого сорта) состоит из операций горячей деформации, комбинированной (механической и ЭХО) и финишной обработки.

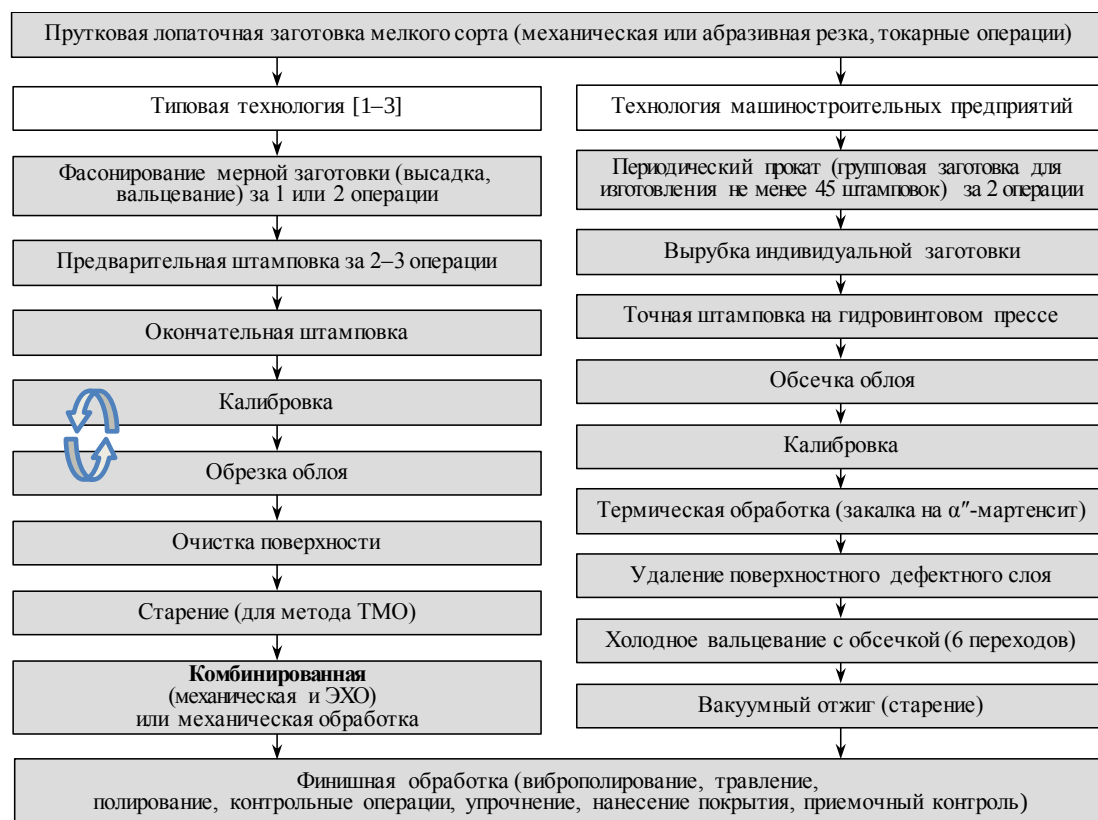


Рис. 2. Типовые схемы изготовления рабочих лопаток с замком типа «ласточкин хвост» (ТМО – термомеханическая обработка, ЭХО – электрохимическая обработка)

Комбинированная или механическая обработка является дорогостоящей операцией в силу необходимости применения оборудования с числовым программным управлением, режущего инструмента с твердосплавными пластинами, оснастки и высокой трудоемкости.

Применение ЭХО экономически целесообразно при обработке пера РЛ в случае средне- или крупносерийного производства и требует предварительного изготовления точных базовых поверхностей, а также удаления растравленного и наводороженного поверхностного слоя полированием. Преимущество ЭХО, заключающееся в возможности обработки сложнопрофильных деталей с малой жесткостью при минимальных площадях поверхностей базирования, благоприятствует его более широкому применению именно для изготовления лопаток компрессора. Экономический анализ технологии изготовления РЛ с использованием механической обработки в сравнении с комбинированным методом приведен в работе [17]. При более высокой стоимости и трудоемкости изготовления технологической оснастки комбинированная технология может быть более экономически эффективной по сравнению с механической обработкой. Кроме того, за рубежом освоено изготовление венцов рабочих колес методом ЭХО, что свидетельствует о потенциальной возможности применения данной технологии при обработке пера лопаток в групповой заготовке.

Из приведенного сравнения становится очевидным, что специалисты машиностроительных предприятий нашли один из вариантов повышения экономической эффективности в серийном производстве РЛ, используя групповую заготовку и заменив большой объем механической обработки процессом холодного вальцевания.

В работе [18] показана возможность изготовления групповых заготовок РЛ посредством блочной штамповки или многоразъемного (до 40 заготовок) штампа (рис. 3)

с помощью штамповки и радиального выдавливания. Однако примеров практической реализации описанной технологии применительно к РЛ из титановых сплавов в открытой печати не найдено.

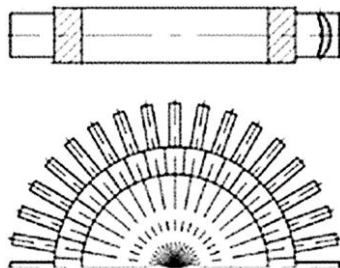


Рис. 3. Вариант групповой штамповки лопаток (до 40 индивидуальных заготовок)

В данной статье на примере жаропрочных титановых сплавов марок ВТ41 и ВТ46 предлагается рассмотреть изготовление серийных изделий авиационной техники – РЛ с хвостовиком типа «ласточкин хвост» с кольцевыми рабочими поверхностями из крупногабаритных штамповок. Данная схема отличается от типовых процессов исходной заготовкой, технологией деформации и операциями предварительной механической обработки.

В качестве объекта серийного производства предлагаются групповые заготовки в форме шайбы, изготовленные методом ИЗШ (рис. 4). Изотермические условия позволяют осуществлять процесс штамповки изделий большой площади проекции и получать небольшие сечения в конечном изделии. Для принятых методов изготовления штамповок лопаток принципиальной основой является метод ТМО, осуществляемый в изотермических условиях.

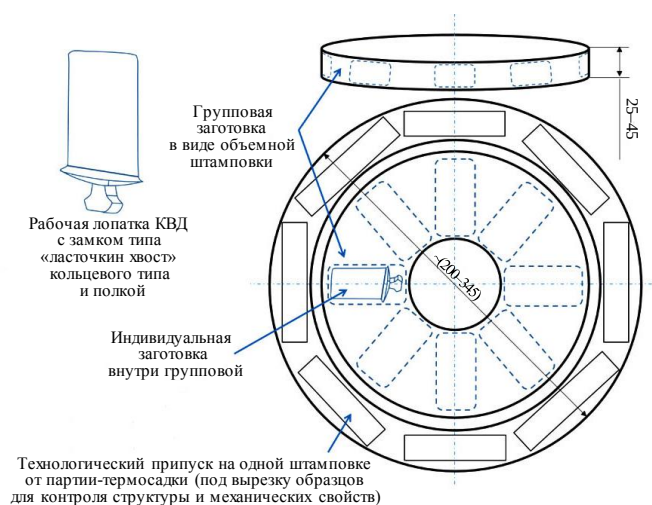


Рис. 4. Рабочая лопатка компрессора высокого давления (КВД) с замком типа «ласточкин хвост» и полкой, вписанная в групповую заготовку

Непосредственно конечная деталь (лопатка) имеет перо (в виде тонкого изогнутого симметричного профиля), полку прямоугольной формы и хвостовик [19]. Габаритные размеры полки определяют толщину групповой заготовки (от 25 до 45 мм), длина лопатки (до 145 мм) – ее диаметр. Такие типоразмеры деталей могут быть востребованы, например, для вертолетных двигателей типа ТВ3-117 [20].

Развивая идею, заложенную в работе [18], и адаптируя ее к реальным производственным условиям с учетом требований к механическим свойствам сплава ВТ41

применительно к наиболее «горячим» лопаткам компрессора высокого давления, проведем анализ технических решений, основанных на традиционной схеме изготовления РЛ из индивидуальных объемных штамповок, а также из групповой заготовки.

Для изготовления групповой заготовки в виде шайбы методом объемной штамповки в качестве исходного материала используют крупногабаритный прутки $\varnothing 80$ –160 мм. Возможность серийного производства таких прутков с регламентированной мелкозернистой структурой длительное время была ограничена технологическими возможностями металлургических предприятий. В частности, до 2000-х гг. получение крупногабаритных прутков требуемого качества в условиях серийного производства не представлялось возможным. В настоящее время на ведущем отечественном металлургическом предприятии, специализирующемся на выпуске продукции из титановых сплавов, освоена серийная поставка крупногабаритных прутков с регламентированной структурой. Номенклатура поставляемых материалов включает различные титановые сплавы, что позволяет использовать такие прутки в качестве заготовок при изготовлении штамповок дисков и рабочих колес компрессора, а также других ответственных деталей авиационной техники [21]. Получение крупногабаритных прутков с подготовленной структурой за рубежом является обязательным требованием к промежуточным полуфабрикатам, предназначенным для изготовления штампованных поковок «роторного качества» [22, 23]. Действующая система отраслевой нормативно-технической документации устанавливает требования к исходной заготовке мелкого сорта, к которой относятся катаные прутки диаметром до 60 мм. Требования к структуре таких прутков, используемых в качестве мерной заготовки для изготовления штамповок РЛ, максимально приближены к требованиям, предъявляемым к структуре материала готовых РЛ. Такой подход направлен на обеспечение стабильности механических свойств материала деталей. В данной работе исследованы механические свойства исходных прутков из сплава ВТ41 $\varnothing 18$ и 150 мм, характеризующихся различной структурой. На основании полученных результатов выполнена сравнительная оценка качества материала исходных прутков и штамповок лопаток, изготовленных по традиционной и новой (с использованием групповой заготовки) технологическим схемам. Аналогичный технологический подход, первоначально рассмотренный для сплава ВТ41, применен к сплаву ВТ46. При этом типовые штамповки лопаток из сплава ВТ46 имеют большие габаритные размеры и изготавливаются на молоте из исходного прутка $\varnothing 48$ мм. В качестве материала для получения групповой заготовки, как и при работе со сплавом ВТ41, использовали промышленный кованый прутки $\varnothing 150$ мм. В соответствии с требованиями отраслевой документации, уровень механических свойств штамповок РЛ из титановых сплавов может варьироваться в зависимости от применяемого метода изготовления: штамповка, ТМО, высокотемпературная ТМО, ИЗШ. Кроме технологического метода, на механические свойства штамповок лопаток оказывают влияние их габаритные размеры, что отражено в табл. 1.

Таблица 1

**Гарантированный уровень прочности и выносливости
штамповок рабочих лопаток из двухфазных жаропрочных титановых сплавов
в зависимости от габаритов штамповок и метода производства**

Метод производства	Габариты лопаток	Уровень прочности, %	Уровень выносливости гладких образцов ($N = 2 \cdot 10^6$ циклов), %
Штамповка	М, С, К	100	100
Термомеханическая обработка	М	110	
	С, К	105	
Высокотемпературная термомеханическая обработка	М, С, К	120	105
Примечание. Габариты лопаток по площади проекции штамповки в плане: М – от 20 до 250 см ² ; С – от 250 до 550 см ² ; К – от 550 до 1500 см ² .			

Уровень прочности материала штамповок после ТМО больше, чем у штамповок в отожженном состоянии. В случае сплава ВТ41 уровень кратковременной прочности будет определяться степенью дисперсионного упрочнения при старении после обработки на твердый раствор на высокотемпературной ступени отжига. Применительно к лопаткам компрессора необходимо найти наилучшее сочетание прочностных и пластических характеристик материала, чтобы обеспечить надежную работу детали в условиях циклического нагружения при максимальной рабочей температуре. Для решения этой задачи предложена технологическая схема изготовления групповой штамповки за один переход с совмещением при необходимости операции правки с первой ступенью отжига. В отличие от метода ТМО, операцию правки штамповки из сплава ВТ41 проводят только в случае коробления при той же температуре, что и нагрев под штамповку, т. е. в верхней части двухфазной области. Для сплава ВТ46 независимо от условий горячей деформации принципиальный подход должен быть основан на методе ТМО, т. е. совмещении операции калибровки с первой ступенью отжига. Это необходимо для достижения наибольшего уровня кратковременной прочности материала.

Сравним технологии механической и комбинированной (механическая и ЭХО) обработки при изготовлении РЛ из индивидуальной мерной заготовки (классические схемы), а также технологию машиностроительных предприятий с применением холодного вальцевания пера с предложенной в данной работе схемой, опираясь на работы [1, 2, 10, 11, 24–27]. В работе [2] приведена диаграмма, иллюстрирующая зависимость себестоимости изготовления РЛ от используемой технологии (рис. 5, а). В то же время в работе [11] представлена зависимость стоимости РЛ от метода изготовления и объема выпуска (рис. 5, б). Различие в характере изменения стоимости РЛ в зависимости от количества изготовленных деталей для способа механической обработки в приведенных примерах, вероятно, обусловлено конструктивно-технологическими причинами. По мнению авторов, при изготовлении серийной продукции чаще встречается тип зависимости, приведенный на рис. 5, б, когда после достижения критического количества стоимость деталей остается практически неизменной. Отметим также, что технология изготовления замка в работе [11] включает операции протягивания при обработке его поверхностей, что значительно удорожает технологию механической обработки.

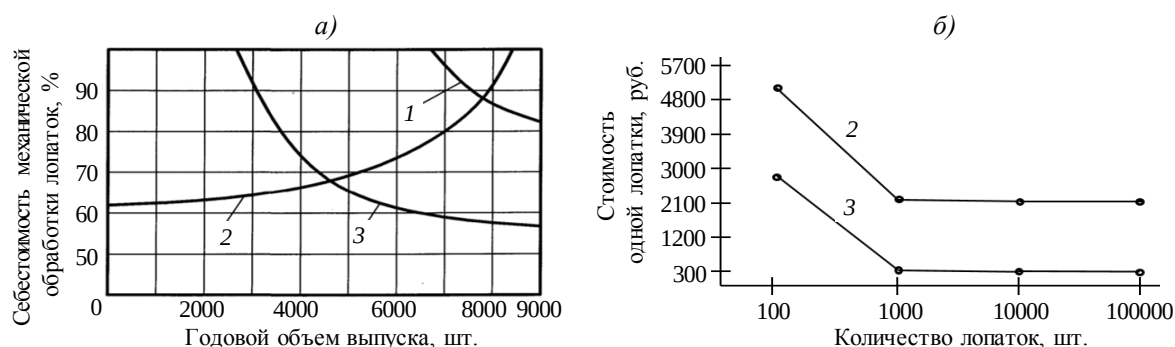


Рис. 5. Диаграмма изменения себестоимости механической обработки рабочих лопаток из титанового сплава [2] (а) и стоимости одного изделия [11] (б) в зависимости от объема выпуска деталей при изготовлении методом вальцевания (1), механической (2) и комбинированной (механической и электрохимической) обработки (3)

Для технологии машиностроительных предприятий с использованием прокатки групповых заготовок себестоимость РЛ (кривая 1 на рис. 5, а) должна снижаться, приближаясь к значениям для технологии комбинированной (механическая + ЭХО) обработки (кривая 3 на рис. 5, а). При этом данная технология требует получения точной

заготовки под вальцевание. Сам процесс вальцевания – многофакторный, при его реализации возможно получение ~12 видов погрешностей (геометрических отклонений и дефектов) по перу РЛ, повышающих объем забракованной продукции и в конечном итоге ее стоимость.

В случае использования предложенной технологической схемы снижение затрат на основные материалы связано в первую очередь с уменьшением стоимости исходного серийно выпускаемого прутка (рис. 6). Во всех случаях стоимость прутка включает затраты на полный объем контроля, предусмотренный отраслевой нормативно-технической документацией, показатели качества прутков различного диаметра схожи по характеристикам.

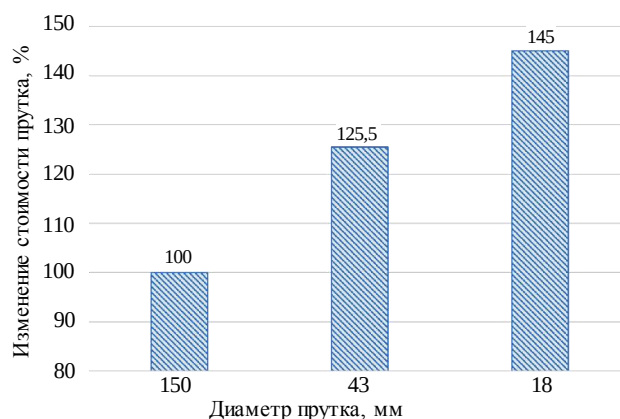


Рис. 6. Изменение стоимости прутка в зависимости от диаметра (поставка с механически обработанной поверхностью и ультразвуковым контролем в иммерсионном варианте)

Уменьшение стоимости металлургического производства исходного прутка [28], включая кузнечный передел, во многом может компенсировать снижение коэффициента использования материала.

Изготовление штамповок, по форме представляющих собой плоские шайбы, при использовании технологических покрытий типа стеклоэмалей не требует обязательного применения специальной штамповой оснастки в условиях ИЗШ. Кроме того, использование эмали обеспечивает уменьшение застойных участков в центральной и поверхностных зонах мерной заготовки при осадке в торец. В настоящее время стойкость плоского бойка из сплава типа ЖС6 оценивается не менее чем в 2000 штамповок рассматриваемого типоразмера, после чего возможна необходимость правки рабочей поверхности бойка на токарном станке со съемом минимального припуска. К недостаткам изотермического деформирования относят высокую энерго- и трудоемкость – требуется время на нагрев изотермической установки, нагрев и поддержание температуры изотермической установки энергозатратны, процесс штамповки, как правило, проводят при низких скоростях деформирования [29]. Гидравлический пресс НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ с максимальным усилием 16000 кН, оборудованный изотермической установкой, после модернизации получил возможность увеличения скорости передвижения траверсы с 2 до 10 мм/с [30]. Снижение трудо- и энергоемкости можно обеспечить при производстве штамповок партиями, проводя операции деформации за один-два перехода с промежуточным подогревом. Операцию правки нужно проводить только в случае коробления, совмещая ее с высокотемпературной ступенью отжига (рис. 7). Изготовление штамповок крупными партиями позволит дополнительно снизить объем контроля механических свойств за счет достижения максимально возможного количества штамповок в одной плавке-термосадке (в соответствии с действующими нормами, контроль штамповок лопаток проводят на одной штамповке от термосадки).

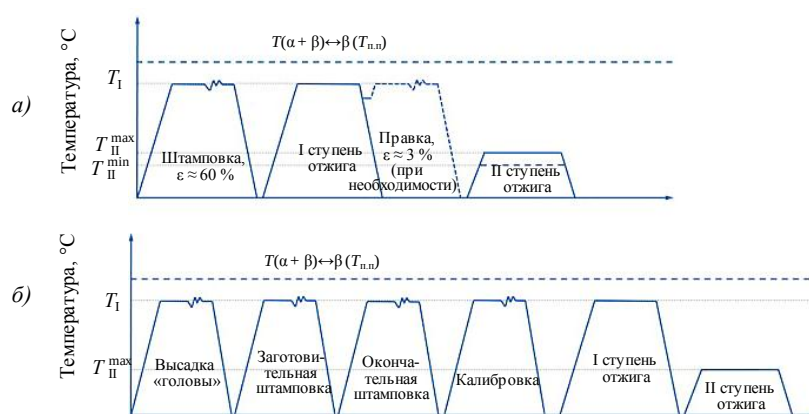


Рис. 7. Технологические схемы изготовления штамповок лопаток из сплава BT41: *а* – групповая заготовка, полученная из прутка $\varnothing 150$ мм на прессе в изотермических условиях; *б* – штамповка рабочей лопатки, изготовленная по традиционной схеме на кривошипном горячештамповочном прессе из прутка $\varnothing 18$ мм (T_I – температура первой ступени отжига; $T_{II}^{\max}$ – максимальная температура второй ступени отжига; $T_{II}^{\min}$ – минимальная температура второй ступени отжига; $T_{п.п.}$ – температура полного полиморфного превращения; ε – деформация)

Для сплава BT46 при изготовлении групповой заготовки операция калибровки проведена с кратковременным подогревом заготовки после операции штамповки по схеме, представленной на рис. 7, *а*, вместо операции правки. При этом выбрана одинаковая температура штамповки и калибровки ($T_{п.п.} = 65^\circ\text{C}$). Изготовление штамповки лопатки из сплава BT46 по типовой технологической схеме на молоте проводили методом ТМО при температуре нагрева заготовки $T_{п.п.} = 40^\circ\text{C}$ по следующей схеме: исходная мерная заготовка $\varnothing 48$ мм → сплющивание → заготовительная штамповка → окончательная штамповка → калибровка, охлаждение на воздухе → старение. Эта схема в части горячей деформации близка к схеме изготовления штамповок из сплава BT41 (рис. 7, *б*) и в общем случае представляет типовую технологию ТМО для большинства штамповок лопаток из титановых сплавов.

Таким образом, предложенная в данной работе технологическая схема изготовления РЛ из групповой заготовки отличается от существующих простотой технологического исполнения как на стадии изготовления штамповок, так и на стадии механической обработки, что положительно сказывается на себестоимости готовых деталей. К преимуществам токарной обработки групповой заготовки можно отнести возможность оптимального распределения съема основного объема припуска, что упрощает технологию финишной обработки поверхностей лопатки из-за благоприятной технологической наследственности [31, 32]. Вариант предварительной механической обработки групповой заготовки приведен на рис. 8.

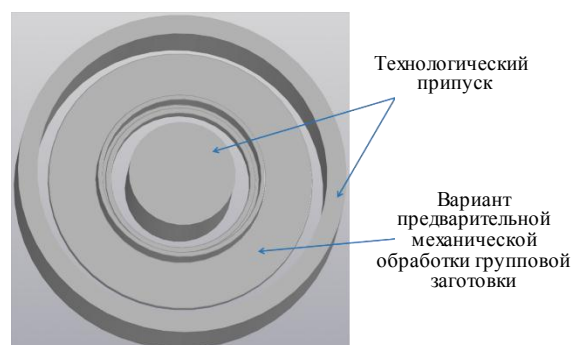


Рис. 8. Вариант предварительной механической обработки групповой заготовки из сплава BT41

Простая форма заготовки в виде тела вращения и возможность быстрого снятия припуска снижают требования к точности геометрических размеров заготовки, практически исключая брак по геометрическим характеристикам штамповок.

Материалы и методы

Для проведения исследований использовали промышленные прутки из сплава ВТ41 Ø18 и 150 мм двух плавов и прутки из сплава ВТ46 Ø48 и 150 мм одной плавки. Термическую обработку прутков для определения механических свойств проводили в заготовках под образцы, штамповки лопаток термически обрабатывали после деформации (для сплава ВТ41 – двойной отжиг, для сплава ВТ46 – низкотемпературное старение). Химический состав плавов, выраженный в структурных эквивалентах по содержанию алюминия и молибдена, а также содержание элементов внедрения (Si, C, O) приведены в табл. 2.

Таблица 2

Химический состав прутков из сплавов ВТ41 и ВТ46, выраженный в структурных эквивалентах по содержанию алюминия и молибдена, и содержание элементов внедрения

Сплав	Диаметр прутка, мм	[Al] _{eq}	[Mo] _{eq}	Содержание элемента, % (по массе)		
				Si	O	C
ВТ41	18	9,33	1,75	0,28	0,1	0,025
	150	9,14	1,95	0,3	0,1	0,025
ВТ46	48	8,63	3,55	0,23	0,13	0,05
	150					

Примечание. Структурные эквиваленты $[Al]_{eq} = \%Al + \%Sn/3 + \%Zr/6 + 10[\%O + \%C]$; $[Mo]_{eq} = \%Mo + \%Nb/3,3 + \%W/2 + \%Fe/0,5$.

Для определения кратковременной прочности использовали стандартные образцы по ГОСТ 1497–2023 с диаметром рабочей части 5 мм и расчетной длиной 25 мм, а также нестандартные образцы с диаметром рабочей части 3 мм (рис. 9). Испытания на ударную вязкость (на образцах с U-образным концентратором) проводили по ГОСТ 9454–2025.

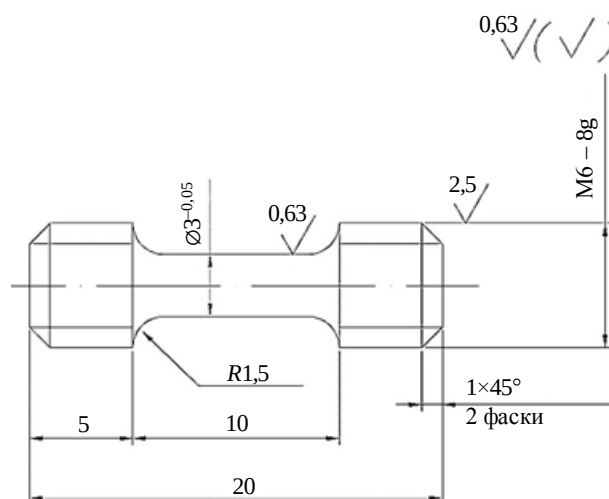


Рис. 9. Малогабаритный образец для испытаний на растяжение

Предел выносливости при испытаниях на многоцикловую усталость определяли на 15–20 образцах с диаметром рабочей части 7,5 мм. Испытания проводили по схеме

«изгиб при вращении» по ГОСТ 25.502–79 [33]. Образцы для определения механических свойств из штамповок и прутка $\varnothing 150$ мм вырезали вдоль волокна. Металлографические исследования проводили на травленных образцах, подготовленных по типовой методике, принятой для титановых сплавов.

Результаты исследований структуры [34] прутков из сплава ВТ41 приведены на рис. 10 и 11, прутков из сплава ВТ46 – на рис. 12, характеристики и описание структуры – в табл. 3.

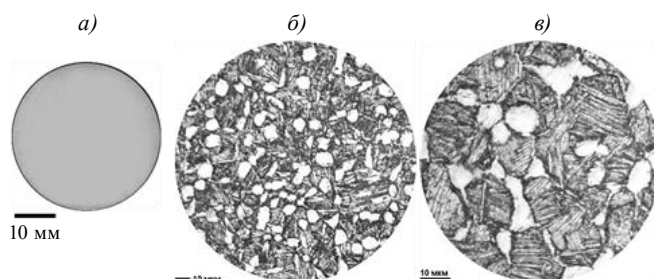


Рис. 10. Макро- (а) и микроструктура (б, в – поперечное и продольное сечение соответственно) катаного прутка $\varnothing 18$ мм из сплава ВТ41 после двойного отжига

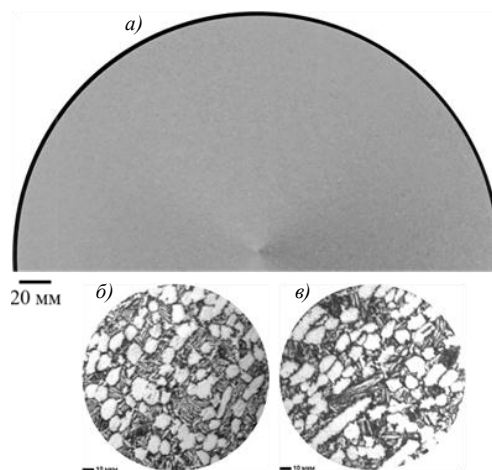


Рис. 11. Макро- (а) и микроструктура (б, в – поперечное и продольное сечение соответственно) кованого прутка $\varnothing 150$ мм из сплава ВТ41 после двойного отжига

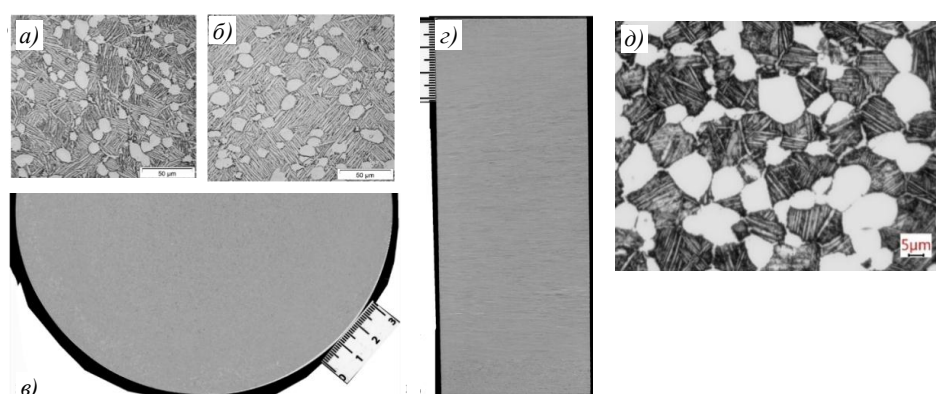


Рис. 12. Микро- (а, б) и макро- (в, г) структура прутков $\varnothing 150$ мм из сплава ВТ46 в отожженном состоянии в поперечном (а, в) и продольном (б, г) сечении, микроструктура катаного прутка $\varnothing 48$ мм в поперечном сечении (д)

Таблица 3

Структура прутков из сплавов ВТ41 и ВТ46

Сплав	Вид прутка	Диаметр прутка, мм	Балл макрозерна (поперечное сечение)	Тональность фона	Тип микроструктуры после двойного отжига
ВТ41	Катаный	18	1–2	Матовая	Глобулярно-пластинчатая, тип 2
	Кованый	150	3–4		
ВТ46	Катаный	48	2 (участки 3)		
	Кованый	150	3–4		

Материал прутков из сплавов ВТ41 и ВТ46 в отожженном состоянии имеет глобулярно-пластинчатую микроструктуру. При этом крупногабаритный кованый прутки отличается большим размером макрозерна и составляющих микроструктуры. Матовая тональность фона макроструктуры крупногабаритного прутка, высокая степень сфероидизации глобулярных частиц первичной α -фазы в продольном сечении, а также небольшой размер макрозерна свидетельствуют о значительной накопленной деформации при вытяжке крупногабаритного прутка при температурах двухфазной области.

Результаты исследования

Механические свойства материала исследовали на штамповках лопаток из сплава ВТ41, изготовленных методом объемной горячей штамповки на кривошипном горячештамповочном прессе (рис. 13) после двойного отжига, а также на штамповках, полученных осадкой в торец прутка $\varnothing 150$ мм в изотермических условиях на гидравлическом прессе после двойного отжига (рис. 14).

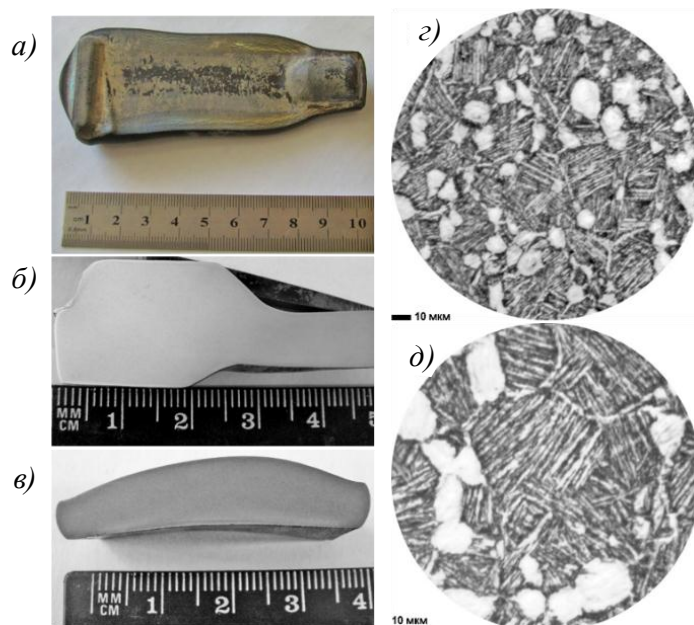


Рис. 13. Штамповка лопатки из сплава ВТ41, изготовленная на кривошипном горячештамповочном прессе после двойного отжига из исходного прутка $\varnothing 18$ мм: внешний вид после горячей деформации (а), макро- (б, в) и микроструктура (г, д) в продольном (б, г) и поперечном (в, д) сечении пера

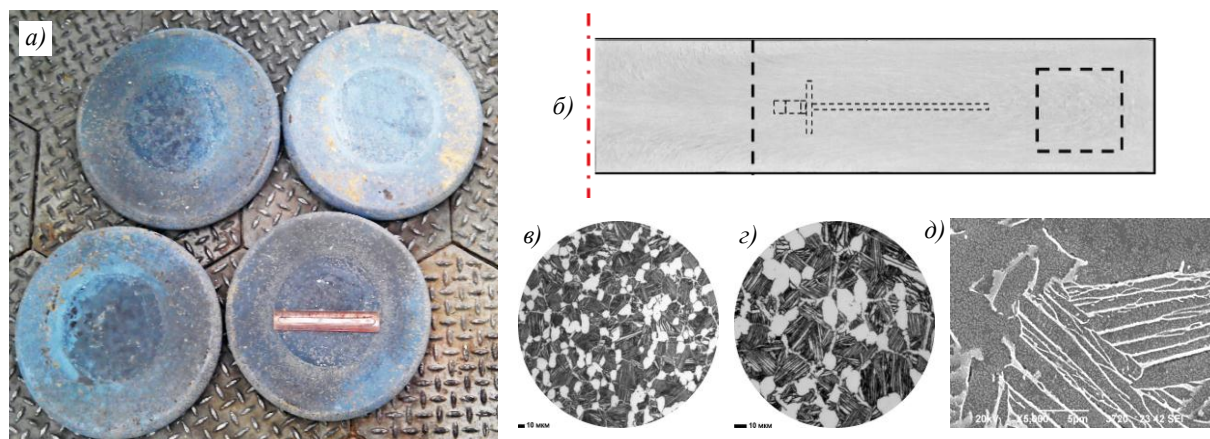


Рис. 14. Штамповка (групповая заготовка) из сплава ВТ41 после двойного отжига из исходного прутка $\varnothing 150$ мм: *а* – внешний вид штамповок для изготовления групповых заготовок; *б* – макроструктура половины радиального сечения; *в*, *з* – типичная микроструктура в продольном направлении (оптическая микроскопия); *д* – участок с пластинками превращенной α -фазы (растровая электронная микроскопия)

В табл. 4 и 5 приведены механические свойства прутков и штамповок из сплава ВТ41, в табл. 6 – многоцикловая усталость гладких образцов и образцов с надрезом.

Таблица 4

**Механические свойства прутков и штамповок лопаток
из сплава ВТ41 при комнатной температуре**

Полуфабрикат, образец для испытаний на растяжение	$\sigma_{0,2}^{20^\circ}$, МПа	$\sigma_B^{20^\circ}$, МПа	δ , %	ψ , %	KCU, Дж/см ²
Катаный прут $\varnothing 18$ мм, стандартный образец ($d_0 = 5$ мм)	$\frac{920-945}{932}$	$\frac{1015-1045}{1029}$	$\frac{11,5-21,0}{17,3}$	$\frac{36,5-46,0}{40,0}$	$\frac{18-22}{19,8}$
Катаный прут $\varnothing 18$ мм, нестандартный образец [35] ($d_0 = 3$ мм)	$\frac{972-978}{975,7}$	$\frac{1052-1063}{1058,3}$	$\frac{14,4-18,5}{16,2}$	$\frac{37,4-39,7}{38,6}$	–
Штамповка, нестандартный образец ($d_0 = 3$ мм)	$\frac{950-974}{960}$	$\frac{1014-1046}{1030}$	$\frac{11,0-13,5}{12,3}$	$\frac{32,1-35,8}{34,2}$	–
Кованый прут $\varnothing 150$ мм, стандартный образец ($d_0 = 5$ мм)	–	$\frac{1135-1150}{1145}$	$\frac{7,2-9,5}{8,2}$	$\frac{16,5-22,0}{19,3}$	$\frac{24-28}{25,3}$
Штамповка (групповая заготовка), стандартный образец ($d_0 = 5$ мм)	$\frac{1050-1075}{1063}$	$\frac{1090-1155}{1129,8}$	$\frac{6,2-14,0}{10,9}$	$\frac{12,5-24,5}{18,3}$	$\frac{16,5-28}{21,9}$
Примечание. В числителе указан диапазон значений, в знаменателе – среднее значение; d_0 – диаметр рабочей части образца.					

Таблица 5

**Механические свойства прутков и штамповок лопаток
из сплава ВТ41 при повышенной температуре**

Полуфабрикат, образец для испытаний на растяжение	$\sigma_{0,2}^{600^\circ}$, МПа	$\sigma_B^{600^\circ}$, МПа	Длительная прочность		Примечание
			напряжение σ , МПа	время до разруше- ния τ , ч	
Катаный пруток Ø18 мм, стандартный образец ($d_0 = 5$ мм)	$\frac{550-575}{559,1}$	$\frac{625-675}{650,8}$	295	78	Разрушен
				92	
			275	107	
				106	
				105	
				102	
Катаный пруток Ø18 мм, нестандартный образец ($d_0 = 3$ мм)	$\frac{580-590}{585}$	$\frac{635-640}{638,3}$	—	—	—
Штамповка, нестандартный образец ($d_0 = 3$ мм)	$\frac{580-620}{598,3}$	$\frac{640-690}{665}$	—	—	—
Кованый пруток Ø150 мм, стандартный образец ($d_0 = 5$ мм)	$\frac{595-625}{608,8}$	$\frac{705-740}{726,3}$	295	120	Снят с ис- пытаний до разрушения
Штамповка (групповая заготовка), стандартный образец ($d_0 = 5$ мм)	$\frac{615-665}{638}$	$\frac{675-750}{714}$	295	139	Снят с ис- пытаний до разрушения
				186	Разрушен
				135	
				136	
				109	
				153	
Примечание. В числителе указан диапазон значений, в знаменателе – среднее значение; d_0 – диаметр рабочей части образца.					

Таблица 6

**Многоцикловая усталость прутков и штамповок из сплава ВТ41
с глобулярно-пластинчатой микроструктурой**

Полуфабрикат	Многоцикловая усталость ($N = 2 \cdot 10^7$ циклов) при температуре, $^\circ\text{C}$			
	20		600	
	$\sigma_{-1}^{\text{гл}}$, МПа	$\sigma_{-1}^{\text{н}}$, МПа ($R = 0,5$ мм)	$\sigma_{-1}^{\text{гл}}$, МПа	$\sigma_{-1}^{\text{н}}$, МПа ($R = 0,5$ мм)
Пруток $\varnothing 18$ мм	510	235	370	157
Штамповка*	480	240	380	180
* Испытания проведены на материале штамповок в форме шайб толщиной 36–45 мм, а также на поковке центробежного колеса.				

На рис. 15 представлены внешний вид и структура штамповки лопатки из сплава ВТ46.



Рис. 15. Внешний вид молотовой штамповки из сплава ВТ46, изготовленной из исходного прутка Ø48 мм (а), типичная микроструктура штамповки при различных увеличениях в поперечном сечении (б–д), макроструктура пера в поперечном сечении (е), микроструктура исходного горячекатаного прутка после двойного отжига в поперечном сечении (е)

Типичная микроструктура групповой заготовки, полученная из прутка Ø150 мм из сплава ВТ46 после ТМО и старения, приведена на рис. 16.

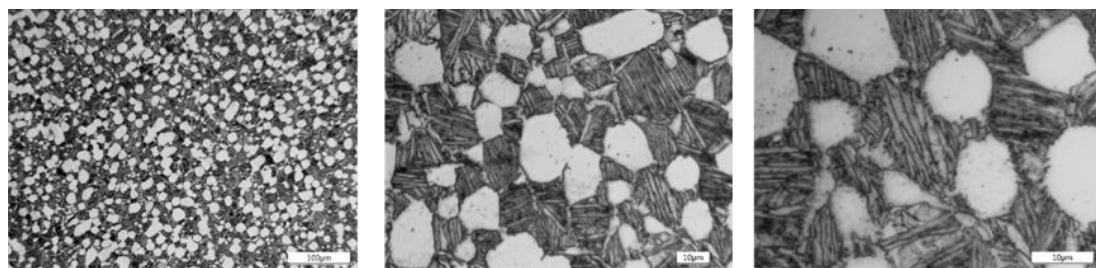


Рис. 16. Микроструктура групповой заготовки из сплава ВТ46 после термомеханической обработки и старения при различных увеличениях

В табл. 7 приведены механические свойства прутков и штамповок из сплава ВТ46.

Таблица 7

**Механические свойства прутков и штамповок
из сплава ВТ46 при комнатной температуре**

Полуфабрикат, образец для испытаний на растяжение, состояние	$\sigma_{0,2}^{20^\circ}$, МПа	$\sigma_B^{20^\circ}$, МПа	δ , %	ψ , %	KCU, Дж/см ²
Катаный пруткок Ø48 мм, стандартный образец ($d_0 = 5$ мм), двойной отжиг	<u>1060–1110</u> 1084	<u>1135–1180</u> 1155	<u>14,4–17,5</u> 16,4	<u>32,8–40,0</u> 37,1	<u>32–48</u> 39,6
Катаный пруткок Ø48 мм, стандартный образец ($d_0 = 5$ мм), одноступенчатый отжиг	<u>990–1020</u> 1005	<u>1095–1100</u> 1099	<u>17,0–18,5</u> 17,8	<u>45,0–48,0</u> 46,3	–
Молотовая штамповка, стандартный образец ($d_0 = 5$ мм), старение при температуре 580 °С, в направлении:					
продольном	<u>1120–1140</u> 1135	<u>1190–1220</u> 1205	<u>9,2–16,0</u> 12,8	<u>13,5–29,0</u> 22,9	<u>35–36</u> 35,5
поперечном	<u>1070–1070</u> 1070	<u>1140–1150</u> 1143	<u>15,5–16,5</u> 16,2	<u>26,0–31,0</u> 29,0	<u>34–35</u> 34,5

Окончание таблицы 7

Полуфабрикат, образец для испытаний на растяжение, состояние	$\sigma_{0,2}^{20^\circ}$, МПа	$\sigma_B^{20^\circ}$, МПа	δ , %	ψ , %	КСУ, Дж/см ²
Молотовая штамповка, стандартный образец ($d_0 = 5$ мм), старение при температуре 590 °С, в продольном направлении	—	$\frac{1235-1260}{1247,5}$	$\frac{10,0-16,0}{13,0}$	$\frac{26,5-30,5}{28,5}$	$\frac{26-38}{32}$
Молотовая штамповка, стандартный образец ($d_0 = 5$ мм), старение при температуре 550 °С, в направлении:					
продольном	$\frac{1040-1060}{1050}$	$\frac{1130-1175}{1153}$	$\frac{11,0-14,5}{12,6}$	$\frac{18,0-34,0}{26,5}$	$\frac{40-44}{42,3}$
поперечном	$\frac{1130-1233}{1149}$	$\frac{1190-1323}{1224}$	$\frac{14,0-17,5}{16,4}$	$\frac{27,0-34,0}{31,3}$	$\frac{34-39}{37}$
Кованый прутки Ø150 мм, стандартный образец ($d_0 = 5$ мм), двойной отжиг в полноразмерном темплете Ø150×500 мм, в направлении:					
продольном	—	$\frac{1119-1141}{1131,3}$	$\frac{12,5-15,1}{13,5}$	$\frac{24,6-34,1}{28,6}$	$\frac{32-40}{37}$
поперечном	—	$\frac{1131-1132}{1131,5}$	$\frac{10,7-11,5}{11,1}$	$\frac{29,2-30,5}{29,9}$	$\frac{32-33}{32,5}$
Штамповка (групповая заготовка) из прутка Ø150 мм, стандартный образец ($d_0 = 5$ мм), термомеханическая обработка в изотермических условиях и старение при 550 °С	$\frac{1055-1070}{1061}$	$\frac{1111-1145}{1127}$	$\frac{10,0-15,0}{12,8}$	$\frac{29,5-37,3}{31,6}$	$\frac{32-38}{34,7}$
Примечание. В числителе указан диапазон значений, в знаменателе – среднее значение; d_0 – диаметр рабочей части образца.					

Результаты испытаний на многоцикловую усталость гладких образцов материала прутков и штамповок из сплава ВТ46 при комнатной температуре приведены на рис. 17.

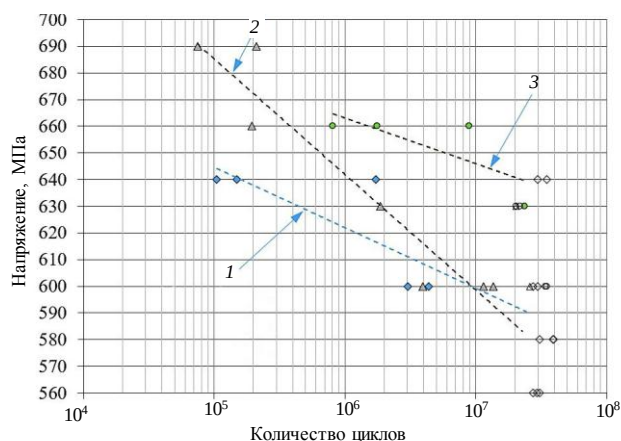


Рис. 17. Результаты испытаний на многоцикловую усталость материала катаного прутка после двойного отжига (1), штамповки после термомеханической обработки в изотермических условиях из прутка Ø150 мм (2) и молотовой штамповки после термомеханической обработки (3) из сплава ВТ46: заштрихованные и обозначенные контуром точки соответствуют разрушенным и снятым без разрушения образцам

В табл. 8 приведены уравнения логарифмической регрессии, построенной по данным для разрушенных образцов, а также погрешность аппроксимации.

Таблица 8

Результаты регрессионного анализа испытаний на многоцикловую усталость для сплава ВТ46

Полуфабрикат, состояние	Уравнение	Погрешность R^2
Катаный прут, двойной отжиг	$-9,847\ln N + 758,01$	0,6135
Молотовая штамповка, термомеханическая обработка и старение	$-7,428\ln N + 765,74$	0,5741
Штамповка (групповая заготовка) из прутка $\varnothing 150$ мм, термомеханическая обработка в изотермических условиях и старение	$-18,82\ln N + 901,98$	0,918

Обсуждение результатов

Целесообразно начать со сравнительного анализа структуры полуфабрикатов из сплава ВТ41. Высокие накопленные деформации в двухфазной области катаного прутка и изготовленных из него штамповок лопаток, малые массы и сечения приводят к измельчению макрозерна и составляющих глобулярно-пластинчатой микроструктуры. При этом высокие скорости деформации, развивающиеся в условиях штамповки на кривошипном горячештамповочном прессе, не приводят к появлению макроструктурной неоднородности в материале штамповки после двойного отжига (рис. 10). Структуры исходного прутка $\varnothing 18$ мм и штамповок лопаток в отожженном состоянии практически идентичны. Частицы первичной α -фазы сфероидизированы, диаметр единичных частиц составляет $\sim(5-8)$ мкм. Частицы вторичной α -фазы сгруппированы в колонии, ограниченные α -оторочкой, образовавшейся по границам условного β -зерна. Размер β -зерна составляет $\sim(30-50)$ мкм. Объемная доля первичной α -фазы достигает $\sim(15-20)$ %.

Микроструктуру крупногабаритного прутка $\varnothing 150$ мм составляют более крупные частицы первичной α -фазы диаметром $\sim(10-12)$ мкм, в продольном сечении наблюдаются частицы вытянутой формы. Большая объемная доля первичной α -фазы объясняется снижением фактической температуры отжига на первой ступени. Для штамповок групповых заготовок в отожженном состоянии выявлена глобулярно-пластинчатая микроструктура с объемной долей первичной α -фазы ~ 20 %, как и в случае с малогабаритными штамповками и прутком $\varnothing 18$ мм. Условные β -зерна, окантованные грубой α -оторочкой толщиной 2–5 мкм, вытянуты вдоль направления течения металла. Колонии превращенной α -фазы состоят из пластинок толщиной 1–3 мкм. Размер условного β -зерна может составлять $\sim(50-150)$ мкм.

Описанные отличия в параметрах глобулярно-пластинчатой микроструктуры отражаются на механических свойствах. Более крупная структура и наличие α -оторочки по границам зерна при заметном снижении характеристик пластичности обеспечивают более высокую жаропрочность материала (табл. 4 и 5). Снижение ударной вязкости в материале с более крупной структурой, вероятно, обусловлено выделением фазы Ti_3Al (α_2) в α -оторочке, где содержание алюминия меньше, чем в глобулях первичной α -фазы, но больше, чем в пластинках вторичной α -фазы [36].

Можно отметить, что прочностные и пластические характеристики исходных прутков и штамповок в обоих случаях для сплава ВТ41 находятся на одном уровне. Таким образом, качество материала штамповок для обеих схем зависит от параметров структуры исходных прутков. Это хорошо заметно по макроструктуре групповой заготовки, макроволокно которой наследуется от исходного прутка (рис. 14, б). В центральной части заготовки, являющейся технологическим припуском (ограничен пунктирной линией на рис. 14, б), вблизи поверхности имеется застойная зона, в которой сохраняется исходная структура прутка.

Более крупная структура групповых заготовок из сплава ВТ41 приводит к снижению предела выносливости гладких образцов при комнатной температуре, при этом обеспечивает большую выносливость образцов с надрезом при комнатной и повышенных температурах (табл. 6).

Для сплава ВТ46 отмечен ряд особенностей. В микроструктуре кованого и горячекатаного прутков, а также штамповок присутствуют крупные частицы первичной α -фазы (рис. 15 и 16), вероятно образованные при изготовлении кованого прутка. Эти частицы наследуются и не подвергаются рекристаллизации как после горячей прокатки в прутки, так и при последующих операциях горячей деформации. Некоторые особенности разрушения образцов с такой структурой описаны в статье [37]. Поскольку в табл. 8 изложены результаты первого опыта промышленного изготовления полуфабрикатов из сплава ВТ46, следует отметить следующее. Сплав ВТ46 продемонстрировал высокую способность к дисперсионному упрочнению при изготовлении штамповок методом ТМО. По сравнению с исходным уровнем прочности на кованом и катаных прутках, где уровень дисперсионного упрочнения после второй ступени отжига составляет ~5 %, процесс ТМО способен увеличить прочность материала на 5–12 %. Имеет место существенная анизотропия свойств в продольном и поперечном сечениях штамповок, изготовленных из исходного горячекатаного прутка. При этом в крупногабаритном прутке $\varnothing 150$ мм она проявляется только на величине ударной вязкости.

Метод ТМО может существенно увеличить показатели выносливости материала (рис. 17, табл. 8), тем не менее для сплава ВТ46 требуется доработка технологии ТМО для достижения статических механических свойств. Для групповой заготовки из сплава ВТ46 также очевидна необходимость в повышении прочностных характеристик. Тем не менее даже с учетом меньшей прочности материала штамповки (групповой заготовки) по сравнению с другими рассмотренными полуфабрикатами метод ТМО оказывает благоприятное влияние на выносливость.

Заключения

На примере жаропрочных титановых сплавов ВТ41 и ВТ46 показано, что технологическая схема изготовления РЛ компрессора из исходного крупногабаритного прутка с получением групповой заготовки методом ИЗШ отличается высокой технико-экономической эффективностью. Основными преимуществами данной схемы являются: применение групповой заготовки для изготовления значительного количества лопаток; простая технология штамповки, не требующая дорогостоящей оснастки; упрощенная технология механической обработки со съемом основного припуска, подготовкой чистовых баз и предварительным профилированием замковой части на токарном оборудовании. Более крупнозернистая структура крупногабаритной групповой заготовки обеспечивает повышенные характеристики жаропрочности и сопротивления усталости при температуре 600 °С по сравнению с действующей технологией с применением прутков мелкого сорта.

Результаты исследования материала штамповок показывают принципиальную возможность получения групповой заготовки в форме шайбы из исходного крупногабаритного прутка из сплавов ВТ41 и ВТ46, при этом качество материала штамповки во многом будет определяться качеством материала прутка. Дальнейшие работы следует проводить в направлении повышения качества материала исходного прутка и степени деформации при осадке мерной заготовки, необходимо уделить существенное внимание режимам и условиям штамповки и калибровки, особенно в отношении сплава ВТ46, а также определить оптимальную степень дисперсионного упрочнения при старении. Хорошо освоенная технология механической обработки методом высокоскоростного фрезерования (точения), а также дальнейшее развитие технологии механической обработки [38–47] способны дополнительно улучшить технико-экономическую эффективность предложенной технологии применительно к лопаткам компрессора из титановых сплавов.

Список источников

1. Крымов В.В., Елисеев Ю.С., Зудин К.И. Производство лопаток газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение / Машиностроение-Полет, 2002. 376 с.
2. Сутягин А.Н. Современные проблемы технологии производства авиационных двигателей: конспект лекций. Рыбинск: РГАТУ, 2016. 142 с.
3. Дьяконов Г.С., Яковлева Т.В., Стоцкий А.Г. и др. Термическая стабильность и механические свойства ультрамелкозернистого титанового сплава BT8M-1 // XXV Уральская школа металлословов-термистов «Актуальные проблемы физического металлословения сталей и сплавов»: сб. тез. докл. Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2020. С. 17–19.
4. Кандаров И.В., Салищев Г.А., Панкратов Д.Л. и др. Исследование эффективности применения метода интенсивной пластической деформации в технологическом процессе получения штамповок лопаток компрессора ГТД // Фундаментальные исследования. 2016. № 10. С. 504–508.
5. Кандаров И.В. Формирование регламентированной структуры в сплаве BT6 для повышения эксплуатационных свойств лопаток газотурбинного двигателя: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Набережные Челны, 2016. 18 с.
6. Попов А.А., Попова М.А. Изотермические диаграммы выделения силицидных и алюминидных фаз в жаропрочных титановых сплавах // Металловедение и термическая обработка металлов. 2016. № 11. С. 23–28.
7. Zhang J., Peng N., Wang Q., Wang X. A New Aging Treatment Way for Near alpha High Temperature Titanium Alloys // Journal Material Science and Technology. 2009. Vol. 25. No. 4. P. 454–458.
8. Болховитин М.С., Королев Н.Н., Монахова В.П. Повышение эффективности управления технологическим процессом точной штамповки при изготовлении лопаток компрессора газотурбинных двигателей // Труды МАИ. 2015. № 81. С. 1–13.
9. Струговец С.А., Кривошеев И.А., Галиулин Р.М. и др. Разработка метода параметрической диагностики технического состояния ГТД на основе анализа эрозии лопаток и закономерностей протекания характеристик компрессора // Вестник УГАТУ. 2010. Т. 14. № 4 (39). С. 3–10.
10. Гишваров А.С., Аитов Р.Р., Айтумбетов А.М. Исследование эффективности пылезащитных устройств вертолетных газотурбинных двигателей // Вестник УГАТУ. 2015. Т. 19. № 2 (68). С. 100–110.
11. Корсунов К.А., Ашихмина Е.А. Анализ некоторых физико-технических характеристик ионно-плазменного покрытия (TiZr)N на лопатках ротора компрессора газотурбинного двигателя ТВ3-117 // Автоматическая сварка. 2014. № 2. С. 49–54.
12. Мубояджян С.А., Александров Д.А., Горлов Д.С., Егорова Л.П., Булавинцева Е.Е. Защитные и упрочняющие ионно-плазменные покрытия для лопаток и других ответственных деталей компрессора ГТД // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 71–81.
13. Александров Д.А., Мубояджян С.А., Луценко А.Н., Журавлева П.Л. Упрочнение поверхности титановых сплавов методом ионной имплантации и ионного модифицирования // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 2 (51). С. 33–39. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-33-39.
14. Ратенко В.Д., Симкин Э.Л. Особенности эксплуатации турбовального двигателя ТВ3-117 // Научный вестник ГОСНИИ ГА. 2016. № 15 (326). С. 82–91.
15. Абдельвахид М.Б. Методика оценки влияния климатических условий и эрозионного износа на характеристики ТРДДФ: дис. ... канд. техн. наук. М., 2015. 175 с.
16. Нихамкин М.Ш., Семенова И.В. Вероятностная оценка стойкости лопаток компрессора ГТД к повреждению посторонними предметами // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королева (национального исследовательского университета). 2009. № 3–2. С. 93–97.
17. Валиев А.И. Сравнительный анализ изготовления лопаток компрессора газотурбинного двигателя // Фундаментальные исследования. 2017. № 5. С. 36–41.
18. Воробьев В.М. Групповая точная штамповка отдельных лопаток компрессора ГТД с готовыми функциональными поверхностями // Двигатель. 2010. № 4 (70). С. 16–19.

19. Петров А.В., Тихомиров В.В., Донченко В.В. Влияние масштабного фактора и вида граничных условий на собственные частоты и формы колебаний лопаток авиационных ГТД с различными типами замковых соединений // Вестник двигателестроения. 2013. № 1. С. 58–64.
20. Богданов А.Д., Калинин Н.П., Кривко А.И. Турбовальный двигатель ТВ3-117ВМ (конструкция и техническое обслуживание). М.: Воздушный транспорт, 2000. 392 с.
21. Тетюхин В.В., Шибанов А.С., Пузаков И.Ю. и др. Разработка технологии изготовления полуфабрикатов из сплавов титана, исключаящей дефектообразование и повышающей контролепригодность материала // Новости материаловедения. Наука и техника. 2015. № 6 (18). С. 34–38. URL: <https://www.materialsnews.ru> (дата обращения: 28.09.2026).
22. Inagaki I., Shirai Y., Takechi T., Ariyasu N. Application and Features of Titanium for the Aerospace Industry. Technical Review // // Nippon steel & sumitomo metal technical report. 2014. No. 106. P. 22–27. URL: <https://www.nipponsteel.com/en/tech/report/nssmc/pdf/106-05.pdf> (дата обращения: 28.09.2026).
23. 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). С. 52–63. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.09.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-52-63.
24. Яшин М.С., Баженов А.Р. Изучение термомеханических параметров деформации и механических свойств титанового сплава марки ВТ30 в зависимости от условий деформирования // Труды ВИАМ. 2024. № 3 (133). С. 18–29. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.09.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-3-18-29.
25. Каблов Е.Н. Ключевая проблема – материалы // Тенденции и ориентиры инновационного развития России. М.: ВИАМ, 2015. С. 458–464.
26. 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.
27. Каблов Е.Н., Кашапов О.С., Медведев П.Н., Павлова Т.В. Исследование двухфазного титанового сплава системы Ti–Al–Sn–Zr–Si–β-стабилизаторы // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 1 (58). С. 30–37. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-30-37.
28. Макушина М.А., Кочетков А.С., Виноградов И.Д. Статистическая оценка однородности химического состава слитков вакуумно-дугового переплава из экономнолегированного титанового сплава ВТ40Л // Труды ВИАМ. 2022. № 11 (117). С. 27–36. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.09.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-27-36.
29. Разуваев Е.И., Моисеев Н.В., Капитаненко Д.В., Бубнов М.В. Современные технологии обработки металлов давлением // Труды ВИАМ. 2015. № 2. С. 15–19. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.09.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-2-3-3.
30. Пономаренко Д.А., Скугорев А.В., Сидоров С.А., Строков В.В. 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.
31. Белоусов М.Г., Цуркаль А.А. Исследование факторов, влияющих на повреждаемость и разрушение лопаток компрессоров авиационных двигателей // Труды МАИ. 2013. № 65. С. 20.
32. Сененко С.А., Богачев И.А., Шошев Ф.Л. Влияние фракционного состава металлопорошковой композиции сплава ВТ6 на шероховатость поверхности, структуру и механические свойства синтезированного материала, полученного селективным электронно-лучевым сплавлением // Труды ВИАМ. 2024. № 6 (136). С. 29–41. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.09.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-6-29-41.
33. Беляев М.С., Хвацкий К.К., Горбовец М.А. Сравнительный анализ российского и зарубежных стандартов испытаний на усталость металлов // Труды ВИАМ. 2014. № 9. С. 140–152. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.09.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-9-11-11.

34. Путьрский С.В., Плохих А.И., Арисланов А.А., Наприенко С.А., Анисимова А.Ю. Исследование структуры и механических свойств материала со слоистой структурой на основе композиции из титановых сплавов BT1-0 и BT47 // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 2 (71). С. 36–50. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 29.09.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-36-50.
35. Горбовец М.А., Ходинев И.А., Каранов В.А., Юшин В.Д. Влияние вида нагружения на многоцикловую усталость жаропрочных сплавов // *Труды ВИАМ*. 2019. № 3 (75). С. 96–104. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.09.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-96-104.
36. Yang X., Guo H., Yao Z., Yuan Sh. Effect of isothermal forging strain rate on microstructures and mechanical properties of BT25y titanium alloy // *Materials Science & Engineering A*. 2016. Vol. 673. P. 355–361. DOI: 10.1016/j.msea.2016.07.084.
37. Гриневич А.В., Сibaев И.Г., Наприенко С.А., Кашапов О.С., Калашников В.С. Кинетика аномального разрушения образца из титанового сплава // *Труды ВИАМ*. 2026. № 5 (159). С. 145–158. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.09.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-5-145-158.
38. Lima de Paiva R., Rosa Ribeiro da Silva L., Baldin V. et al. Review of innovative strategies and future prospects in challenging-to-machine materials // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2026. No. 145. P. 1667–1689.
39. Hourmand M., Sarhan A., Sayuti M., Hamdi M. A Comprehensive Review on Machining of Titanium Alloys // *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2021. No. 46. P. 7087–7123. DOI: 10.1007/s13369-021-05420-1.
40. Wang G., Chen X., Xu Z. et al. Advanced Precision Cutting Titanium Alloy Methods: A Critical Review // *Considering Cost, Efficiency, and Quality. Technologies*. 2025. No. 13–172. P. 1–40. DOI: 10.3390/technologies13050172.
41. Ullah I., Akinlabi E.T., Aydin M., Songmene V. Numerical analysis of cyclic residual stress induced by thermo-mechanical loads in high-speed milling of TC4 titanium alloy // *Machining Science and Technology*. 2026. Vol. 30. No. 4. P. 691–713. DOI: 10.1080/10910344.2026.2621197.
42. Yi J., Wang R., Du D. et al. Prediction of Micro-Milling-Induced Residual Stress and Deformation in Titanium Alloy Thin-Walled Components and Multi-Objective Collaborative Optimization // *Materials*. 2026. Vol. 19. No. 2. Art. 219. DOI: 10.3390/ma19020219.
43. Liu D., Ni C., Wang Y. et al. Effect of anisotropic property on machining response of selective laser melted Ti6Al4V alloys in high-speed milling // *Journal of Manufacturing Processes*. 2025. Vol. 145. P. 158–171. DOI: 10.1016/j.jmapro.2025.04.066.
44. Tu Z., Lian Z. Experimental study and modeling of cutting force in high-speed milling of Ti–6Al–4V titanium alloy // *Journal of Mechanics*. 2025. Vol. 41. P. 55–63. DOI: 10.1093/jom/ufaf006.
45. Yan J., Suhaimi M.A., Sharif S. et al. Enhancing tool life and surface quality in high-speed milling of Ti6Al4V: a comparative study of flood and minimum quantity lubrication cooling strategies // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2025. Vol. 141. P. 3089–3110. DOI: 10.1007/s00170-025-1680.
46. Wang Q., Chen X., An Q. et al. Research on cutting performance and tool life improvement methods of titanium alloy ultra-high speed milling tools // *Journal of Manufacturing Processes*. 2024. Vol. 131. P. 38–51. DOI: 10.1016/j.jmapro.2024.09.018.
47. Wang R., Song Q., Peng Y. et al. Toward digital twins for high-performance manufacturing: Tool wear monitoring in high-speed milling of thin-walled parts using domain knowledge // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2024. Vol. 88. Art. 102723. DOI: 10.1016/j.rcim.2024.102723.

References

1. Krymov V.V., Eliseev Yu.S., Zudin K.I. *Production of gas turbine engine blades*. Moscow: Mashinostroyenie / Mashinostroyenie-Polet, 2002, 376 p.
2. Sutyagin A.N. *Modern problems of aircraft engine production technology: lecture notes*. Rybinsk: RGATU, 2016, 142 p.
3. Dyakonov G.S., Yakovleva T.V., Stotsky A.G. et al. Thermal stability and mechanical properties of ultrafine-grained titanium alloy VT8M-1. *XXV Ural School of Metallurgical Thermal Scientists «Current Problems of Physical Metallurgy of Steels and Alloys»*: collection of abstract report. Ekaterinburg: Ural Univ. Publ. House, 2020, pp. 17–19.

4. Kandarov I.V., Salishchev G.A., Pankratov D.L. et al. Study of the effectiveness of using the method of intense plastic deformation in the technological process of obtaining stampings of gas turbine engine compressor blades. *Fundamentalnye issledovaniya*, 2016, no. 10, pp. 504–508.
5. Kandarov I.V. *Formation of a regulated structure in the VT6 alloy to improve the performance properties of gas turbine engine blades*: thesis, abstract Cand. Sc. (Tech.). Naberezhnye Chelny, 2016, 18 p.
6. Popov A.A., Popova M.A. Isothermal diagrams of the release of silicide and aluminide phases in heat-resistant titanium alloys. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2016, no. 11, pp. 23–28.
7. Zhang J., Peng N., Wang Q., Wang X. A New Aging Treatment Way for Near alpha High Temperature Titanium Alloys. *Journal Material Science and Technology*, 2009, vol. 25, no. 4, pp. 454–458.
8. Bolkhovitin M.S., Korolev N.N., Monakhova V.P. Improving the efficiency of precision forging process control in the manufacture of gas turbine engine compressor blades. *Trudy MAI*, 2015, no. 81, pp. 1–13.
9. Strugovets S.A., Krivosheev I.A., Galiulin R.M. et al. Development of a method for parametric diagnostics of the technical condition of gas turbine engines based on the analysis of blade erosion and compressor performance trends. *Vestnik UGATU*, 2010, vol. 14, no. 4 (39), pp. 3–10.
10. Gishvarov A.S., Aitov R.R., Aitumbetov A.M. Investigation of the efficiency of dust protection devices for helicopter gas turbine engines. *Vestnik UGATU*, 2015, vol. 19, no. 2 (68), pp. 100–110.
11. Korsunov K.A., Ashikhmina E.A. Analysis of certain physicochemical characteristics of the (TiZr)N ion-plasma coating on compressor rotor blades of the TV3-117 gas turbine engine. *Avtomaticeskaya svarka*, 2014, no. 2, pp. 49–54.
12. Muboyadzhyan S.A., Aleksandrov D.A., Gorlov D.S., Egorova L.P., Bulavinceva E.E. Protective and strengthening ion-plasma coverings for blades and other responsible details of the GTE compressor. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2012, no. 5, pp. 71–81.
13. Aleksandrov D.A., Muboyadzhyan S.A., Lutsenko A.N., Zhuravleva P.L. Hardening of the surface of titanium alloys by ion implantation method and ionic modification. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2018, no. 2 (51), pp. 33–39. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-33-39.
14. Ratenko V.D., Simkin E.L. Operational characteristics of the TV3-117 turboshaft engine. *Nauchnyy vestnik GOSNII GA*, 2016, no. 15 (326), pp. 82–91.
15. Abdelvakhid M.B. *Methodology for assessing the impact of climatic conditions and erosive wear on the performance of augmented turbofan engines*: thesis, Cand. Sc. (Tech.). Moscow, 2015, 175 p.
16. Nikhamkin M.Sh., Semenova I.V. Probabilistic assessment of gas turbine engine compressor blade resistance to foreign object damage. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika S.P. Koroleva (natsionalnogo issledovatel'skogo universiteta)*, 2009, no. 3–2, pp. 93–97.
17. Valiev A.I. Comparative analysis of gas turbine engine compressor blade manufacturing. *Fundamentalnye issledovaniya*, 2017, no. 5, pp. 36–41.
18. Vorobyev V.M. Precision group forging of individual gas turbine engine compressor blades with finished functional surfaces. *Dvigatel*, 2010, no. 4 (70), pp. 16–19.
19. Petrov A.V., Tikhomirov V.V., Donchenko V.V. Influence of the scale factor and boundary conditions on natural frequencies and mode shapes of aviation gas turbine engine blades with various types of root attachments. *Vestnik dvigatelestroeniya*, 2013, no. 1, pp. 58–64.
20. Bogdanov A.D., Kalinin N.P., Krivko A.I. *TV3-117VM Turboshaft Engine (Design and Maintenance)*. Moscow: Vozdushny Transport, 2000, 392 p.
21. Tetyukhin V.V., Shibano A.S., Puzakov I.Yu. et al. Development of a manufacturing technology for titanium alloy semi-finished products that eliminates defect formation and improves material inspectability. *Novosti materialovedeniya. Nauka i tekhnika*, 2015, no. 6 (18), pp. 34–38. Available at: <https://www.materialsnews.ru> (accessed: September 28, 2026).
22. Inagaki I., Shirai Y., Takechi T., Ariyasu N. Application and Features of Titanium for the Aerospace Industry. Technical Review. *Nippon steel & sumitomo metal technical report*, 2014, no. 106, pp. 22–27. Available at: <https://www.nipponsteel.com/en/tech/report/nssmc/pdf/106-05.pdf> (accessed: September 28, 2026).

23. 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), pp. 52–63. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 28, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-52-63.
24. Yashin M.S., Bazhenov A.R. Investigation of thermomechanical parameters of deformation and mechanical properties depending on conditions of deformation of titanium alloy VT30. *Trudy VIAM*, 2024, no. 3 (133), pp. 18–29. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 28, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-3-18-29.
25. Kablov E.N. The Key Problem: Materials. *Trends and Guidelines for Russia's Innovative Development*. Moscow: VIAM, 2015, pp. 458–464.
26. 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.
27. Kablov E.N., Kashapov O.S., Medvedev P.N., Pavlova T.V. Study of a $\alpha + \beta$ -titanium alloy based on a system of Ti–Al–Sn–Zr–Si– β -stabilizing alloying elements. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 30–37. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-30-37.
28. Makushina M.A., Kochetkov A.S., Vinogradov I.D. Statistical evaluation of the homogeneity of the chemical composition of vacuum-arc remelting ingots from economic alloy titanium VT40L. *Trudy VIAM*, 2022, no. 11 (117), pp. 27–36. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 28, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-27-36.
29. Razuvaev E.I., Moiseev N.V., Kapitanenko D.V., Bubnov M.V. Modern technologies of plastic working of metals. *Trudy VIAM*, 2015, no. 2, pp. 15–19. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 28, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-2-3-3.
30. Ponomarenko D.A., Skugorev A.V., Sidorov S.A., Stokov V.V. Technological capabilities of specialized isothermal presses with forces of 6,3 and 16 MN in the production of aircraft components. *Kuznechno-shtampovochnoye proizvodstvo. Obrabotka metallov davleniyem*, 2015, no. 9, pp. 36–40.
31. Belousov M.G., Tsurkal A.A. Investigation of factors influencing damage and failure of aircraft engine compressor blades. *Trudy MAI*, 2013, no. 65, p. 20.
32. Senenko S.A., Bogachev I.A., Shoshev F.L. Effect of the fractional composition of the metal-powder composition of the VT6 alloy on the surface roughness, structure and mechanical properties of the printed material obtained by selective electron beam melting. *Trudy VIAM*, 2024, no. 6 (136), pp. 29–41. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 28, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-6-29-41.
33. Belyaev M.S., Khvatskiy K.K., Gorbovets M.A. Comparative analysis of national standards of RF and the USA on methods of metals fatigue testing. *Trudy VIAM*, 2014, no. 9, pp. 140–152. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 28, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-9-11-11.
34. Putyrskiy S.V., Plokhikh A.I., Arislanov A.A., Naprienko S.A., Anisimova A.Yu. Study of structure and mechanical properties of the laminar structure material based on titanium alloys VT1-0 and VT47. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), pp. 36–50. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 29, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-36-50.
35. Gorbovets M.A., Khodinev I.A., Karanov V.A., Yushin V.D. Influence of the type of loading on high-cycle fatigue of heat-resistant alloys. *Trudy VIAM*, 2019, no. 3 (75), pp. 96–104. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 28, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-96-104.
36. Yang X., Guo H., Yao Z., Yuan Sh. Effect of isothermal forging strain rate on microstructures and mechanical properties of BT25y titanium alloy. *Materials Science & Engineering A*, 2016, vol. 673, pp. 355–361. DOI: 10.1016/j.msea.2016.07.084.
37. Grinevich A.V., Sibayev I.G., Naprienko S.A., Kashapov O.S., Kalashnikov V.S. Kinetics of anomalous fracture of a titanium alloy sample. *Trudy VIAM*, 2026, no. 5 (159), pp. 145–158. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 28, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-5-145-158.

38. Lima de Paiva R., Rosa Ribeiro da Silva L., Baldin V. et al. Review of innovative strategies and future prospects in challenging-to-machine materials. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2026, no. 145, pp. 1667–1689.
39. Hourmand M., Sarhan A., Sayuti M., Hamdi M. A Comprehensive Review on Machining of Titanium Alloys. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2021, no. 46, pp. 7087–7123. DOI: 10.1007/s13369-021-05420-1.
40. Wang G., Chen X., Xu Z. et al. Advanced Precision Cutting Titanium Alloy Methods: A Critical Review. *Considering Cost, Efficiency, and Quality. Technologies*, 2025, no. 13–172, pp. 1–40. DOI: 10.3390/technologies13050172.
41. Ullah I., Akinlabi E.T., Aydin M., Songmene V. Numerical analysis of cyclic residual stress induced by thermo-mechanical loads in high-speed milling of TC4 titanium alloy. *Machining Science and Technology*, 2026, vol. 30, no. 4, pp. 691–713. DOI: 10.1080/10910344.2026.2621197.
42. Yi J., Wang R., Du D. et al. Prediction of Micro-Milling-Induced Residual Stress and Deformation in Titanium Alloy Thin-Walled Components and Multi-Objective Collaborative Optimization. *Materials*, 2026, vol. 19, no. 2, art. 219. DOI: 10.3390/ma19020219.
43. Liu D., Ni C., Wang Y. et al. Effect of anisotropic property on machining response of selective laser melted Ti6Al4V alloys in high-speed milling. *Journal of Manufacturing Processes*, 2025, vol. 145, pp. 158–171. DOI: 10.1016/j.jmapro.2025.04.066.
44. Tu Z., Lian Z. Experimental study and modeling of cutting force in high-speed milling of Ti–6Al–4V titanium alloy. *Journal of Mechanics*, 2025, vol. 41, pp. 55–63. DOI: 10.1093/jom/ufaf006.
45. Yan J., Suhaimi M.A., Sharif S. et al. Enhancing tool life and surface quality in high-speed milling of Ti6Al4V: a comparative study of flood and minimum quantity lubrication cooling strategies. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2025, vol. 141, pp. 3089–3110. DOI: 10.1007/s00170-025-1680.
46. Wang Q., Chen X., An Q. et al. Research on cutting performance and tool life improvement methods of titanium alloy ultra-high speed milling tools. *Journal of Manufacturing Processes*, 2024, vol. 131, pp. 38–51. DOI: 10.1016/j.jmapro.2024.09.018.
47. Wang R., Song Q., Peng Y. et al. Toward digital twins for high-performance manufacturing: Tool wear monitoring in high-speed milling of thin-walled parts using domain knowledge. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2024, vol. 88, art. 102723. DOI: 10.1016/j.rcim.2024.102723.

Информация об авторах

Несоленов Антон Викторович, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Павлова Тамара Васильевна, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Кашапов Олег Салаватович, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Кондратьева Анастасия Романовна, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

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

Information about the authors

Anton V. Nesolenov, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Tamara V. Pavlova, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Anastasia R. Kondratyeva, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Статья поступила в редакцию 02.10.2026; одобрена и принята к публикации после рецензирования 09.10.2026.
The article was submitted 02.10.2026; approved and accepted for publication after reviewing 09.10.2026.