

УДК 546.82

М.А. Макушина¹, А.С. Кочетков¹, Н.А. Ночовная¹

ЛИТЕЙНЫЕ ТИТАНОВЫЕ СПЛАВЫ ДЛЯ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ (обзор)

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-7-39-47

Рассмотрены литейные титановые сплавы, применяемые в конструкции авиационных изделий и двигателей. Представлены описания литейных свойств титановых сплавов. Изложены требования к отливкам из титановых сплавов, указанные в отраслевой нормативно-технической документации. Рассмотрены основные характеристики их свойств, достоинства и недостатки. Описаны некоторые методы повышения показателей механических свойств. Сделаны выводы о современной ситуации в области авиационных литейных титановых сплавов и изделий из них.

Ключевые слова: титан, литейные сплавы, литейные свойства, горячее изостатическое прессование, термическая обработка, интерметаллидные сплавы, легирующие элементы.

М.А. Makushina¹, A.S. Kochetkov¹, N.A. Nochovnaya¹

CAST TITANIUM ALLOYS FOR AVIATION EQUIPMENT (review)

This article discusses cast titanium alloys used in the construction of aircraft products and engines. Descriptions of the casting properties of titanium alloys are presented. The requirements for castings made of titanium alloys specified in the industry regulatory and technical documentation are set out. The main characteristics of their properties, advantages and disadvantages are considered. Some methods of increasing the parameters of mechanical properties are described. Conclusions are drawn about the current situation in the field of aviation foundry titanium alloys and products made from them.

Keywords: titanium, casting alloys, casting properties, hot isostatic pressing, heat treatment, intermetallic alloys, alloying elements.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Широкое применение титановых сплавов в конструкциях авиационной и ракетной техники началось еще в середине 1960-х гг. Причиной этого стали известные преимущества титановых сплавов – например, такие как более высокая удельная прочность (отношение прочностных характеристик к плотности) в широком интервале температур по сравнению со сплавами алюминия, сталями и другими сплавами (табл. 1), а также коррозионная стойкость в различных средах [1–3]. Повышение удельной прочности материала деталей, как известно, ведет к облегчению конструкции, что является одним из основополагающих принципов современных разработок, и отражено в стратегии развития ФГУП «ВИАМ» [4].

Таблица 1

Сравнительные удельные характеристики сплавов на основе Ti, Al, Mg и Fe [5]

| Сплав | Основа сплава | Плотность d , кг/м ³ | Предел прочности при растяжении σ_B , МПа | Удельная прочность σ_B/d , м ² /с ² |
|-----------|---------------|-----------------------------------|--|--|
| AK12 | Алюминий | 2660 | 160 | 7400 |
| AK9 | | 2650 | 230 | 8700 |
| AM5 | | 2780 | 335 | 12000 |
| МЛ5 | Магний | 1830 | 230 | 12600 |
| МЛ12 | | 1810 | 230 | 12700 |
| Сталь 25Л | Железо | 7850 | 450 | 5700 |
| X18H9ТЛ | | 7900 | 490 | 6200 |
| BT5Л | Титан | 4410 | 690 | 15400 |
| BT20Л | | 4500 | 940 | 20900 |

В настоящее время наибольшее распространение получили литейные и деформируемые титановые сплавы. Литейные сплавы имеют меньшую прочность, пластичность и сопротивление усталости по сравнению с деформируемыми. Однако у литейных сплавов имеются и неоспоримые преимущества – возможность изготовления из них широкой номенклатуры сложнопрофильных фасонных деталей, а также повышенный (по сравнению с заготовками, обрабатываемыми давлением и последующей механической обработкой) коэффициент использования материала (КИМ). При изготовлении сложных титановых деталей из штампованных заготовок КИМ составляет 0,05–0,15. Применение фасонного литья для получения таких же деталей, или близких к ним по геометрической форме, позволяет повысить КИМ до 0,3 и более [2]. Несмотря на описанные преимущества, внедрение литейных титановых сплавов в машиностроительную отрасль началось гораздо позднее, чем деформируемых. Как известно, титан активно взаимодействует с газами и формовочными материалами в расплавленном состоянии, в связи с этим потребовалась разработка принципиально нового класса оборудования – вакуумного. Проблема взаимодействия с формовочными материалами в настоящее время также решена – формы изготавливают из графита, корунда, магнезита и силикатного песка – материалов, имеющих наименьшее взаимодействие с расплавленным металлом [6].

Литейные характеристики сплавов на основе титана

Возможность применения деталей, изготовленных литьем, для изделий ответственного назначения, в том числе авиационных, зависит не только от уровня их механических характеристик, но и от комплекса литейных свойств выбранного сплава. Основополагающими литейными свойствами являются заполняемость и жидкотекучесть, температурный интервал кристаллизации, линейная и объемная усадка, остаточные макронапряжения.

Титановые сплавы от природы обладают довольно хорошими литейными свойствами. Соответственно двойной диаграмме состояния Ti–Al температурный интервал кристаллизации такой системы небольшой [6, 7]. Легирование сплавов другими элементами оказывает некоторое влияние на температурный интервал кристаллизации [8, 9], но для большинства используемых композиций он обычно не превышает 50–70 °С (табл. 2).

Таблица 2

Температуры ликвидус и солидус литейных титановых сплавов [10]

| Сплав | BT1Л | BT5Л | BT6Л | BT3-1Л | BT9Л | BT14Л | BT20Л | BT21Л |
|--------------|------|------|------|--------|------|-------|-------|-------|
| Ликвидус, °С | 1670 | 1640 | 1650 | 1620 | 1620 | 1650 | 1620 | 1630 |
| Солидус, °С | 1655 | 1600 | 1590 | 1560 | 1560 | 1590 | 1560 | 1550 |

Жидкотекучесть – характеристика, показывающая способность сплава заполнять форму и определяемая по прекращению течения расплава в каналах специальных проб. Жидкотекучесть титановых сплавов находится приблизительно на уровне жидкотекучести углеродистой стали и наиболее эффективно повышается при легировании титана алюминием. Такие элементы, как цирконий, молибден, ниобий и олово, оказывают незначительное влияние на жидкотекучесть сплавов, а хром, марганец, железо, медь и кремний ухудшают ее.

Практически все литейные титановые сплавы, применяемые в авиа- и машиностроении, имеют близкие значения усадки. Линейная усадка сплавов в среднем составляет 1,5 % при литье в керамическую форму и ~2 % – в металлическую. Объемная усадка составляет ~3 %.

Остаточные напряжения I рода (макронапряжения) оказывают особенно заметное влияние на коробление крупных корпусных отливок. Для того чтобы избежать подобных явлений, на отливке устанавливают технологическую перемычку, препятствующую деформации отливки при извлечении ее из формы. Другой способ избавления от остаточных напряжений – отжиг, стабилизирующий структуру и механические свойства. Отливки, имеющие коробления, также могут быть подвергнуты правке в холодном состоянии или подогретыми до 500 °С с последующим контролем отсутствия трещин [11].

Требования к литейным титановым сплавам и отливкам из них

Как показано ранее, предел прочности и усталостные характеристики литых изделий ниже, чем у деформированных, поэтому для достижения наилучших показателей механических свойств применяют газостатирование при температурах 1000–1150 °С и давлении газа до 100 МПа [6]. За рубежом эту обработку называют газостатическим изотермическим прессованием или горячим изостатическим прессованием (ГИП). В действительности прессования отливок как такового не происходит. Поэтому появилось другое название этого процесса – высокотемпературная газостатическая обработка (ВГО). При газостатировании заживляются дефекты литья и измельчается структура, что приводит к улучшению комплекса механических свойств. Оптимальные параметры газостатирования позволяют повысить предел выносливости при циклических нагрузках не менее чем в 1,5–2 раза [2, 12].

Согласно требованиям ОСТ 1 90060–92 отливки из титановых сплавов поставляются в литом состоянии без термической обработки, однако по согласованию между Поставщиком и Заказчиком допустима поставка отливок, прошедших обработку ГИП и подвергнутых термообработке. Показатели механических свойств отливок представлены в табл. 3.

Таблица 3

Механические свойства отливок из титановых сплавов

| Сплав | Предел прочности при растяжении, МПа | Предел текучести, МПа | Относительное | | Ударная вязкость, Дж/см ² |
|-------|--------------------------------------|-----------------------|---------------|---------|--------------------------------------|
| | | | удлинение | сужение | |
| | | | % | | |
| | | | не менее | | |
| BT5Л | 690–980 | 620 | 6 | 14 | 29 |
| BT6Л | 880–1080 | 790 | 5 | 10 | 25 |
| BT9Л | 930–1130 | 810 | 4 | 8 | 20 |
| BT20Л | 880–1130 | 780 | 5 | 12 | 27 |
| BT21Л | 980–1130 | 840 | 4 | 8 | 20 |
| BT40Л | 1030–1200 | 900 | 5 | 12 | 28 |

По ОСТ 1 90060–92 предъявляются требования к дефектам необрабатываемых поверхностей отливок (допускаются дефекты, не превышающие по размеру и количеству указанные в табл. 4) и внутренней пористости (табл. 5) согласно баллу пористости, определяемому по согласованию между Поставщиком и Заказчиком [11].

Таблица 4

Нормы допустимых поверхностных дефектов в отливках из титановых сплавов

| Площадь поверхности отливки, см ² | Количество дефектов на поверхности площадью 100 см ² | Количество дефектов на одной детали |
|--|---|-------------------------------------|
| | не более | |
| До 300 | 2 | 6 |
| Свыше 300 до 600 | 3 | 8 |
| Свыше 600 до 1000 | 4 | 12 |
| Свыше 1000 | 6 | 15 |

Таблица 5

Нормы допустимой внутренней пористости в отливках из титановых сплавов

| Балл пористости | Характер пористости | Пористость (не более) | |
|-----------------|-----------------------|-----------------------|---|
| | | Размер пор, мм | Количество пор на площади 1 см ² |
| I | Малая пористость | 0,1 | 4 |
| II | Пониженная пористость | 0,5 | 4 |
| | | 1,0 | 2 |
| III | Средняя пористость | 0,5 | 8 |
| | | 1,0 | 4 |
| IV | Повышенная пористость | 0,5 | 10 |
| | | 1,0 | 6 |
| V | Большая пористость | От 0,1 до 1,5 | 20 |

Характеристики литейных титановых сплавов

Материалы для фасонного титанового литья представлены несколькими классами:

- α-сплавы (BT1Л и BT5Л);
- псевдо-α-сплавы (BT18УЛ, BT20Л и BT21Л) [13];
- (α + β)-сплавы со сравнительно невысоким количеством β-фазы (BT6Л, BT8Л, BT9Л, BT14Л и BT3-1Л);
- псевдо-β-сплав BT35Л;
- жаропрочные интерметаллидные титановые γ-сплавы (Ti-48-2-2, ВТИ-3Л, ВИТ7Л) [13, 14].

Для литейных титановых сплавов чаще всего применяют два вида термической обработки: отжиг для релаксации напряжений и стабилизации структуры (сплавы псевдо-α- и (α + β)-классов) и старение (псевдо-β-класс, так как сплав BT35Л находится в закаленном состоянии после заливки) [7].

Сплав BT1Л впервые применен для фасонного литья еще в 1956 г. [2]. Отливки из него обладают низкими прочностными свойствами, однако их показатели пластичности наиболее высокие среди других литейных титановых сплавов. Сплав BT1Л обладает хорошим комплексом литейных характеристик, а также хорошей свариваемостью. Область его применения – коррозионноустойчивая арматура для химического производства.

Самым распространенным является α-сплав BT5Л, что вызвано отсутствием дорогостоящих и редких элементов в его составе, хорошим комплексом различных механических свойств (ударная вязкость, циклическая выносливость, пластичность), а также

высокими литейными свойствами. Значение жидкотекучести сплава ВТ5Л наибольшее среди титановых сплавов [12, 15]. Недостатком сплава является невысокий уровень гарантированной прочности [16, 17]. Отливки из сплава хорошо свариваются и в то же время не склонны к горячему растрескиванию. Область применения сплава – литье фасонных отливок для элементов конструкции самолетов и деталей ГТД, а также для создания сложных сварных конструкций с повышенными требованиями к надежности в условиях эксплуатации. Для стабилизации структуры и снятия остаточных напряжений отливки из сплава ВТ5Л могут подвергаться полному или неполному отжигу.

Сплав ВТ6Л легирован Al и V, поэтому имеет преимущество перед сплавом ВТ5Л по прочностным характеристикам при схожих литейных свойствах и показателях пластичности. Сплав ВТ6Л хорошо сваривается, поэтому его применяют для создания надежных сварных элементов в сочетании с деформированными изделиями из сплава ВТ6, используемых в деталях самолета и авиационных двигателях [2]. Для снятия остаточных напряжений проводят отжиг, предпочтительнее вакуумный (для предотвращения окисления поверхности и снижения скорости охлаждения), при температуре 700–800 °С.

Все зарубежные сплавы, применяемые для фасонного литья, совпадают по составу с аналогичными деформируемыми сплавами. Наибольшее распространение получил сплав марки Ti-6-4, который является наиболее распространенным титановым сплавом для производства фасонных отливок с начала 1950-х гг., поскольку обладает наилучшим сочетанием прочностных, пластических и технологических свойств. Сплавы, разработанные позднее, превосходят сплав марки Ti-6-4 или по уровню прочности, или по уровню пластичности, или по характеристикам жаропрочности и вязкости разрушения, но ни один из них не имеет таких сбалансированных характеристик, как сплав Ti-6-4. Сплав широко применяется – из него изготавливают различные детали сложной конфигурации.

Сплавы ВТ3-1Л, ВТ9Л и ВТ14Л – двухфазные сплавы с довольно значительным (10–15 % (по массе)) содержанием β -фазы [14]. Первые два сплава обладают повышенной жаропрочностью, в связи с чем их используют в авиационных двигателях для деталей с высокими требованиями к рабочей температуре. Ранее эти детали изготавливали штамповкой из тех же сплавов, поэтому при переходе на литье признано целесообразным менять их марку [6].

По аналогичной причине среди титановых сплавов, предназначенных для изготовления отливок, появился сплав ВТ14Л. При разработке данного сплава учитывали необходимость соединения отливок из сплава ВТ14Л с обшивкой из сплава ВТ14 методом сварки плавлением, поскольку использование для изготовления отливок сплава другой марки потребовало бы проведения дополнительных исследований. Для данного сплава характерны повышенные прочностные свойства при сохранении удовлетворительной пластичности и хорошая свариваемость.

Кроме того, для фасонного литья нередко применяется сплав ВТ20Л. Легирование дополнительно Mo и Zr обеспечивает его превосходство по сравнению со сплавом ВТ5Л по прочностным свойствам. При этом сплав отличается хорошими литейными характеристиками и отличной свариваемостью, в том числе и со сплавами других марок. Сплав ВТ20Л используется для изготовления элементов конструкции планера – колец, фланцев, обойм, корпусов, в том числе деталей сложной конфигурации, а также прочих деталей и узлов самолетов и ракетно-космической техники.

Специально разработанный литейный сплав ВТ21Л уступает остальным сплавам по своим литейным свойствам, но превосходит их по прочностным характеристикам [6]. Легирование Zr, Cr и Mo значительно расширяет область кристаллизации сплава и,

как следствие, для него характерны пониженная жидкотекучесть и повышенная склонность к порообразованию. Отливки из сплава ВТ21Л обладают повышенным уровнем прочностных характеристик, но их пластичность невелика. Сплав применяется для изготовления отливок простой геометрической формы, используемых в конструкциях, подвергающихся воздействию высоких нагрузок.

Среди литейных титановых сплавов присутствует сплав ВТ23Л, обладающий высокими прочностными характеристиками. Однако сплавы ВТ1Л и ВТ5Л превосходят данный сплав по пластичности. Литейные свойства сплава ВТ23Л также находятся на невысоком уровне. В зависимости от скорости охлаждения структура изделий из сплава ВТ23Л может состоять из α -, β - и α'' -фаз. Изделия, изготовленные из него, применяются в узлах и агрегатах, эксплуатируемых в условиях высоких температур [16, 18].

Из-за высокого содержания β -стабилизаторов в сплаве ВТ35Л при охлаждении после затвердевания сохраняется метастабильная β -структура. Последующее газостатирование и старение обеспечивают высокие прочностные характеристики при сохранении удовлетворительной пластичности, поэтому сплав относят к высокопрочным, с высокой усталостной долговечностью. Технологичность сплава находится приблизительно на одном уровне со сплавом ВТ20Л. Из сплава ВТ35Л могут изготавливать литые высоконагруженные детали для космической и авиационной техники [2, 19].

Из псевдо- α -титанового сплава ВТ18УЛ изготавливают отливки деталей крыльчаток и турбин, температура эксплуатации которых достигает 550 °С. Это связано с его способностью сохранять высокие значения прочностных характеристик даже при повышенных температурах. Литейные свойства сплава высокие благодаря хорошей жидкотекучести и заполняемости [12, 20].

В начале 2000-х гг. во ФГУП «ВИАМ» создан новый титановый литейный сплав ВТ40Л. При его разработке использован принцип экономного легирования, который основан на применении небольших концентраций легирующих элементов, имеющих сравнительно невысокую стоимость и/или входящих в состав наиболее распространенных лигатур (ВнАл, АМТ, МФТА и т. д.). В таких сплавах также возможно использование доступных «естественных» лигатур – например, ферротитана. Преимуществом такой концепции легирования сплавов является использование отходов титанового производства и лома при выплавке. Сплав ВТ40Л помимо основных легирующих элементов содержит элементы внедрения – углерод и кислород, которые являются сильными упрочнителями. Однако, как известно, элементы внедрения снижают пластичность сплава, в связи с чем во ФГУП «ВИАМ» проведена работа по подбору оптимального содержания кислорода и углерода в сплаве ВТ40Л [21–23] – в результате достигнуты высокие значения надежности и прочностных характеристик в диапазоне рабочих температур (табл. 6). В табл. 7 представлены сравнительные данные о механических свойствах наиболее распространенных литейных титановых сплавов.

Таблица 6

Механические свойства сплава ВТ40Л при различных температурах [6]

| Температура испытания, °С | σ_B , МПа | δ | ψ | КСУ | КСТ | σ_{100}^{350} , МПа |
|---------------------------|------------------|-----------|---------|--------------------|-----------|----------------------------|
| | | % | | МДж/м ² | | |
| -70 | 1340 | 7,3–8,5 | 14–21 | – | – | – |
| 20 | 1030–1170 | 10,0–12,8 | 14–37 | 0,37–0,5 | 0,13–0,17 | – |
| 350 | 790–855 | 10,7–12,7 | 27–40,3 | – | – | 760 |
| 400 | 780–840 | 13,1–13,3 | 42 | – | – | – |

Таблица 7

Механические свойства литейных титановых сплавов [8]

| Сплав | σ_b , МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | δ , % | ψ , % | КСУ, Дж/см ² |
|-------|------------------|----------------------|--------------|------------|-------------------------|
| BT5Л | 690 | 618 | 6 | 14 | 29,4 |
| BT6Л | 834 | 736 | 5 | 10 | 24,5 |
| BT20Л | 932 | 834 | 8 | 20 | 24,5 |
| BT40Л | 1030 | 900 | 5 | 12 | 29,4 |

Как видно из данных, приведенных в табл. 6 и 7, экономнолегированный литейный титановый сплав BT40Л превосходит серийные промышленные сплавы BT6Л и BT20Л по механическим свойствам. Применение отливок из сплава BT40Л взамен отливок из сплавов BT6Л и BT20Л приведет к заметному увеличению прочности конструкции, повышению сопротивления усталости, а также к снижению массы конструкции.

Сплав предназначен для получения фасонных отливок кронштейнов, корпусов, крыльчаток, турбинных колес и промежуточных опор. Отливки из этого сплава имеют прочность на уровне 1030 МПа и повышенные характеристики многочасовой прочности при сопротивлении усталости, поэтому могут использоваться взамен сплавов BT6Л и BT20Л.

Во ФГУП «ВИАМ» имеется полный цикл производства литых изделий из сплавов титана, в том числе интерметаллидных, включающее вакуумно-дуговые печи для выплавки слитков массой до 35 кг, участок изготовления керамических форм и вакуумно-индукционную печь с водоохлаждаемым тиглем для литья отливок массой до 2–3 кг, газостат для проведения ГИП (ВГО), а также вакуумные и атмосферные печи для проведения термической обработки. На оборудовании ФГУП «ВИАМ» возможно изготовление отливок практически из любых литейных титановых сплавов, в том числе из сплава BT40Л.

Заключения

Литейные титановые сплавы широко востребованы ввиду существенного повышения КИМ при изготовлении сложнопрофильных деталей по сравнению с технологией изготовления деформируемых сплавов даже несмотря на превосходство последних по механическим характеристикам. При необходимости изготовления изделий сложной конфигурации технология обработки давлением существенно уступает литейной технологии. Однако достоинства деформированных изделий очевидны. Литейные характеристики титановых сплавов высоки ввиду природных особенностей сплавов, поэтому при освоении технологии литья не потребовалась разработка сплавов специальных составов – большинство марок сплавов по основным легирующим элементам совпадает с составом деформируемых сплавов. Титановые сплавы хорошо свариваются, поэтому возможно изготовление сложных сварных конструкций из деформированных и литых частей аналогичных по составу сплавов.

В авиастроении наиболее часто используемыми сплавами являются сплавы марок BT5Л, BT6Л и BT20Л. Однако в настоящее время существует сплав, превосходящий по механическим характеристикам и удельным свойствам упомянутые сплавы – это сплав BT40Л. Замена авиационных деталей из сплавов BT5Л, BT6Л и BT20Л на аналогичные детали из сплава BT40Л может привести к существенному улучшению весовых характеристик и, как следствие, к повышению топливной эффективности. Производителем отливок из сплава BT40Л наряду с другими предприятиями отрасли может быть и ФГУП «ВИАМ».

В настоящее время в конструкции авиационных двигателей целесообразно использовать литые лопатки турбины низкого давления из интерметаллидных титановых γ -сплавов взамен лопаток из жаропрочных никелевых сплавов. В связи с этим во ФГУП «ВИАМ» проводятся активные исследования и разработка материалов для такой замены [24–27].

Библиографический список

1. Каблов Е.Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 // Крылья Родины. 2019. № 7–8. С. 54–58.
2. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства: справочник. М.: ВИЛС-МАТИ, 2009. 520 с.
3. Антипов В.В. Перспективы развития алюминиевых, магниевых и титановых сплавов для изделий авиационно-космической техники // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 5. С. 186–194. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-186-194.
4. Дуюнова В.А., Леонов А.А., Молодцов С.В. Вклад ВИАМ в разработку легких сплавов и борьбу с коррозией изделий ракетно-космической техники // Труды ВИАМ. 2020. № 2 (86). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 26.02.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-2-22-30.
5. Бибииков Е.Л., Ильин А.А. Литье титановых сплавов: учеб. пособие. М.: Альфа-М: ИНФРА-М, 2014. 304 с.
6. Братухин А.Г., Бибииков Е.Л., Глазунов С.Г. и др. Производство фасонных отливок из титановых сплавов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: ВИЛС, 1998. 292 с.
7. Моисеев В.Н. Титан и титановые сплавы // Машиностроение: энциклопедия: в 40 т. / под ред. К.В. Фролова. М.: Машиностроение, 2001. Т. II-3: Цветные металлы и сплавы. С. 272–353.
8. Колачев Б.А., Полькин И.С., Талалаев В.Д. Титановые сплавы разных стран. М.: ВИЛС, 2000. 318 с.
9. Titanium and titanium alloys. Fundamentals and applications / ed. C. Leyens, M. Peters. Wiley-VCH, 2003. 513 p.
10. Авиационные материалы: справочник: в 12 т. / под общ. ред. Е.Н. Каблова. 7-е изд., перераб. и доп. М.: ВИАМ, 2010. Т. 6: Титановые сплавы. 96 с.
11. Отливки фасонные из титановых сплавов. Технические условия: ОСТ 1 90060–92: утв. Департамент авиац. пром-сти Рос. Федерации 16.11.1992; ввод. в действие с 01.03.1993. М.: ВИАМ, 1992. 12 с.
12. Кузьмичева Л.Г., Введенская Е.К., Шаханова Г.В., Яновская Н.В. Развитие и промышленное применение высокотемпературной газостатической обработки титановых и жаропрочных никелевых сплавов // Технология легких сплавов. 1998. № 2. С. 20–24.
13. 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.
14. Ночовная Н.А., Базылева О.А., Каблов Д.Е., Панин П.В. Интерметаллидные сплавы на основе титана и никеля / под общ. ред. Е.Н. Каблова. 2-е изд., с изм. и доп. М.: ВИАМ, 2019. 316 с.
15. Рахманкулов М.М., Пращенко В.М. Технология литья жаропрочных сплавов. М.: Интермет Инжиниринг, 2000. 464 с.
16. Илларионов А.Г., Попов А.А. Технологические и эксплуатационные свойства титановых сплавов: учеб. пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. 137 с.
17. Колачев Б.А., Елисеев Ю.С., Братухин А.Г., Талалаев В.Д. Титановые сплавы в конструкциях и производстве авиадвигателей и авиационно-космической техники. М.: Изд-во МАИ, 2001. 412 с.
18. Дзунович Д.А., Панин П.В., Лукина Е.А., Ширяев А.А. Влияние режимов термической обработки на структуру и свойства сварных крупногабаритных полуфабрикатов из титанового сплава VT23 // Труды ВИАМ. 2018. № 1 (61). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.03.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-1-7-7.

19. Борисова Е.А., Бочвар Г.А., Брун М.Я. и др. Титановые сплавы. Металлография титановых сплавов. М.: Металлургия, 1980. 464 с.
20. Братухин А.Г., Колачев Б.А., Садков В.В. и др. Технология производства титановых самолетных конструкций. М.: Машиностроение, 1995. 448 с.
21. Сплав на основе титана и изделие, выполненное из него: пат. 2222627 Рос. Федерация; заявл.03.06.02; опубл. 27.01.04.
22. Ночовная Н.А., Панин П.В., Алексеев Е.Б., Боков К.А. Современные экономнолегированные титановые сплавы: применение и перспективы развития // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2016. № 9 (735). С. 8–15.
23. Ночовная Н.А., Панин П.В., Кочетков А.С., Боков К.А. Опыт ВИАМ в области разработки и исследования экономнолегированных титановых сплавов нового поколения // *Труды ВИАМ*. 2016. № 9 (45). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.03.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-9-5-5.
24. Kochetkov A.S., Panin P.V., Nochovnaya N.A., Makushina M.A. Study of chemical inhomogeneity in beta-solidifying TiAl alloys of various composition // *Metallurgist*. 2021. Vol. 64. No. 9–10. P. 962–973. DOI: 10.1007/s11015-021-01077-1.
25. Горлов Д.С., Александров Д.А., Заклякова О.В., Азаровский Е.Н. Исследование возможности защиты интерметаллидного титанового сплава от фреттинг-износа путем нанесения ионно-плазменного покрытия // *Труды ВИАМ*. 2018. № 4 (64). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.03.2021). DOI: 10/18577/2307-6046-2018-0-4-51-58.
26. Кочетков А.С. Структура и свойства литейных титановых сплавов различных систем легирования в тонкостенных фасонных отливках: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: ВИАМ, 2016. 23 с.
27. Дзунович Д.А., Алексеев Е.Б., Панин П.В., Лукина Е.А., Новак А.В. Структура и свойства листовых полуфабрикатов из деформируемых интерметаллидных титановых сплавов разных классов // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 2 (51). С. 17–25. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-17-25.