

УДК 669.295

А.Л. Яковлев¹, А.А. Арисланов¹, С.В. Путырский¹, Н.А. Ночовная¹

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И СТРУКТУРЫ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT6ч

DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-12-18

Представлены результаты проведенного комплекса исследований (анализ микроструктуры, а также определение механических свойств при растяжении, ударной вязкости (ККУ), малоциклового усталости (МЦУ), вязкости разрушения (K_{Ic})) крупногабаритной поковки из титанового сплава VT6ч, предусматривающих при изготовлении окончательную деформацию в ($\alpha+\beta$)-области, а также крупногабаритных профиля и штамповки из титанового сплава VT6ч, предусматривающих при изготовлении окончательную деформацию в β -области.

Проведен сравнительный анализ полученных в результате исследований данных, показывающей зависимость механических свойств полуфабрикатов с пластинчатой структурой от размеров структурных составляющих – первичных β -зерен и колоний α -пластин. Особенно это заметно для характеристик пластичности.

Ключевые слова: титановые сплавы, крупногабаритные полуфабрикаты, деформация, механические свойства, микроструктура, термическая обработка.

A.L. Yakovlev¹, A.A. Arislanov¹, S.V. Putyrskiy¹, N.A. Nochovnaya¹

STUDY OF MECHANICAL PROPERTIES AND STRUCTURE OF LARGE-SIZED SEMI-FINISHED PRODUCTS MADE OF VT6ch TITANIUM ALLOY

The article presents the results of a complex of studies (analysis of microstructure, as well as determination of mechanical properties under tension, impact strength (KCU), low-cycle fatigue (LCF), fracture toughness (K_{Ic})) of large-sized forgings made of titanium alloy Vt6ch, providing for the final deformation in the ($\alpha+\beta$)-region, as well as large-sized profiles and stamping made of titanium alloy Vt6ch, providing for the final deformation in the β -region.

A comparative analysis of the data obtained during the research shows the dependence of the mechanical properties of semi-finished products with plate-like structure on the size of the structural components – of primary β -grains and colonies of α -plates. This is especially noticeable for the characteristics of plasticity.

Keywords: titanium alloys, large-sized semi-finished products, deformation, mechanical properties, microstructure, heat treatment.

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

В течение 1970-х гг. была проведена большая совместная работа металлургического завода ВСМПО (г. Верхняя Салда), научных институтов ВИАМ и ВИЛС по уточнению состава и технологии производства полуфабрикатов из сплава VT6 модификации «ч». В итоге этой работы отработан химический состав и внесены дополнения в шихтовую нормаль по расчетному составу сплава. Отличительной особенностью шихтовки сплава VT6ч (по сравнению со сплавом VT6) является дополнительное легирование его кислородом

до 0,16% (по массе) (в последующем – до 0,2% (по массе)) и ограничение легирования железом до 0,4% (по массе) [1]. Кислород в данном сплаве является легирующим элементом, а не примесью.

С целью повышения стабильности механических и технологических характеристик уменьшен интервал легирования по содержанию алюминия с 1,5 до 1,25% (по массе) и установлен предел 5,5–6,75% (по массе). Такое легирование позволило обеспечить заданный уровень прочности сплава – $\sigma_b=850-900$ МПа (в зависимости от сечения полуфабриката).

Необходимо отметить, что зарубежный сплав-аналог Ti-6-4 (США) обладает практически полностью идентичным химическим составом [2].

Сплав ВТ6ч нашел широкое применение в отечественном авиастроении [3, 4]. Из данного сплава возможно изготавливать детали и элементы силового набора планера летательного аппарата. Полуфабрикатами для изготовления такого рода деталей служат профили, штамповки, поковки и др. В СССР было налажено производство крупногабаритных полуфабрикатов из титанового сплава ВТ6ч и деталей из них, в том числе сварных [5], а также разработан и изготовлен целый комплекс технологического оборудования, включающий линии крупногабаритных металлообрабатывающих станков, обтяжных прессов, закалочных, сварочных и термообрабатывающих печей и установок.

Вследствие распада СССР произошло прекращение производства целой серии изделий авиационной техники. В результате было остановлено изготовление уникальных крупногабаритных полуфабрикатов из титанового сплава ВТ6ч, таких как поковки сечением >200 мм, штамповки массой >1 т, профили длиной >20 м и массой >3 т.

За прошедшие годы полностью или частично утеряны технологические приемы и технологии производства полуфабрикатов, документация, уникальное оборудование для производства полуфабрикатов и деталей из них, штамповая оснастка и инструмент. На металлургических заводах изменилось оснащение оборудованием, в том числе необходимым для выпуска крупногабаритных полуфабрикатов, – произошла замена или модернизация. Новое оборудование обладает характеристиками, отличающимися от ранее применяемого. Включение новых единиц оборудования в технологическую схему по изготовлению крупногабаритных полуфабрикатов требовало корректировки параметров технологических процессов.

Для обеспечения производства силового набора планера изделий авиационной техники разработаны технологии изготовления и режимы термической обработки крупногабаритных полуфабрикатов из титанового сплава ВТ6ч, которые обеспечивают получение полуфабрикатов, обладающих повышенным уровнем свойств в сравнении с аналогичными видами крупногабаритных полуфабрикатов из титанового сплава ВТ6ч, серийно выпускавшихся ранее. Основным и крупнейшим производителем полуфабрикатов из титановых сплавов является ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» [6].

Известно, что путем оптимизации структуры можно добиться реализации существен-

ных резервов повышения механических свойств титановых сплавов [7]. Таким образом, задача оптимизации структуры полуфабрикатов из титановых сплавов до сих пор имеет важное значение.

Актуальными в настоящее время являются вопросы влияния структуры на характеристики работоспособности титановых сплавов [8]. К числу таких характеристик, изучению которых в последние годы посвящено немало количество работ, относятся:

- вязкость разрушения (K_{Ic}), определяющая сопротивляемость материала разрушению при статическом или усталостном нагружении в случае наличия в нем трещин;

- сопротивление усталостным нагрузкам, характеризующее долговечность материала в различных условиях циклического нагружения [9].

В данной статье проведено сравнение полученных при испытаниях значений механических свойств крупногабаритных полуфабрикатов из титанового сплава ВТ6ч, различных по технологическим параметрам изготовления, а также проведен анализ влияния окончательной деформации в β -области на различные характеристики и структуру изготовленных полуфабрикатов.

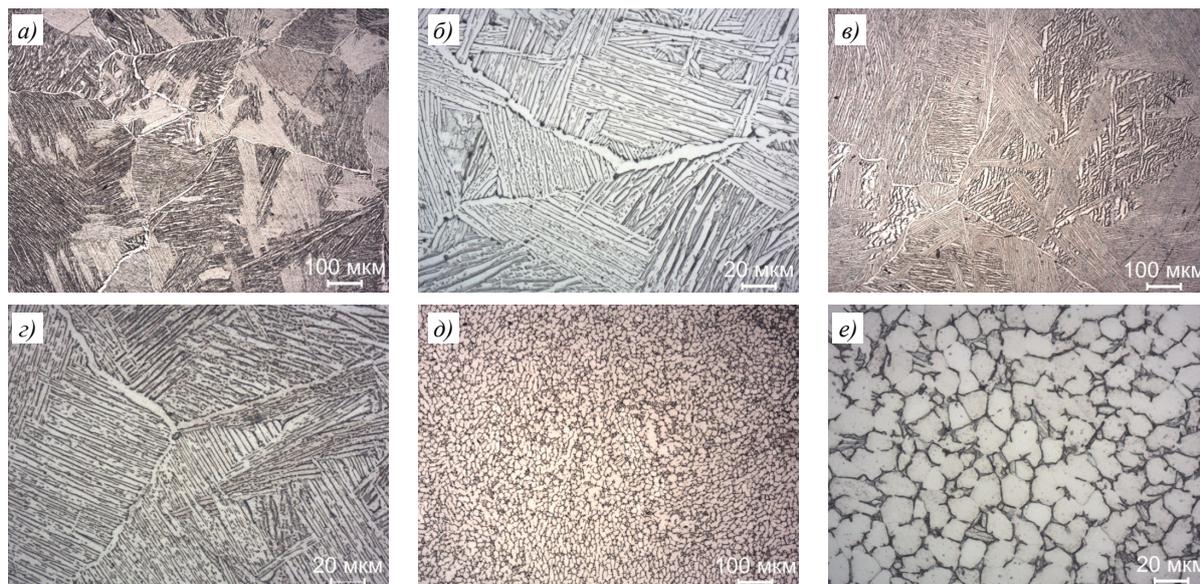
Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 8. «Легкие, высокопрочные коррозионностойкие свариваемые сплавы и стали, в том числе с высокой вязкостью разрушения» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [10].

Материалы и методы

Осуществлено изготовление крупногабаритных полуфабрикатов из титанового сплава ВТ6ч: профили (массой >3500 кг, длиной >20 м), штамповки (массой >1400 кг) и поковки (массой >700 кг, сечением >200 мм).

Изготовление профиля происходило в операции с АО «Евраз НТМК» (г. Нижний Тагил), где проходил процесс прокатки на универсальном балочном стане под длинномерный профиль предварительно деформированной на ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» заготовки. Весь цикл изготовления поковки и штамповки осуществляли на производственных мощностях ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА».

Следует отметить, что технология изготовления крупногабаритных профилей и штамповок предусматривает окончательную деформацию в β -области. Это обусловлено невозможностью продеформировать такой объем металла в ($\alpha+\beta$)-области для достижения необходимой геометрической формы крупногабаритных полуфабрикатов. Деформацию



Микроструктуры профиля (а, б), штамповки (в, г) и поковки (д, е) из сплава ВТ6ч (поперечное направление)

штамповки проводили на крупнейшем в стране и одном из наиболее мощных прессов в мире – прессе 170 с усилием 75000 тс на ПАО «Корпорация ВСППО-АВИСМА».

Испытания образцов из титанового сплава ВТ6ч проводили:

- на растяжение – по ГОСТ 1497–84 на испытательной машине Zwick/Roell Z 050;
- на ударную вязкость – по ГОСТ 9754–78 на маятниковом копре РН300-СНУ фирмы Walter+Bai AG;
- на малоцикловую усталость (МЦУ) – по ГОСТ 25.502–79 на испытательной машине LFV-100 №1867 фирмы Walter+Bai AG;
- на вязкость разрушения (K_{Ic}) – по ГОСТ 25.506–85 на испытательной машине MTS-50 т.

Исследования микроструктуры выполняли на оптическом микроскопе Olympus GX51.

Результаты

Анализ микроструктуры

Проведены исследования микроструктуры образцов, изготовленных из профиля, штамповки и поковки. Изображения микроструктур профиля, штамповки и поковки представлены на рисунке.

Микроструктура профиля однородная, представлена крупными бывшими β -зернами с оторочкой α -фазы по их границам и внутризерненными разориентированными колониями α -фазы пластинчатой морфологии. Данная микроструктура характерна для проведения заключительной стадии деформации в однофазной β -области.

Микроструктура штамповки по строению схожа с микроструктурой профиля, представ-

лена деформированными бывшими β -зернами и пластинчатой α -фазой по границам и внутри них. Данная микроструктура также характерна для проведения заключительной стадии деформации в однофазной β -области. Необходимо отметить, что микроструктура штамповки представлена более крупными β -зернами и более мелкими α -пластинами, чем микроструктура профиля, что обуславливает снижение пластических характеристик.

Микроструктура поковки однородная, хорошо проработанная, представлена преимущественно глобулярными частицами α -фазы с отдельными участками пластинчатой морфологии на фоне β -матрицы. Данная микроструктура характерна для проведения деформации на заключительной стадии в двухфазной ($\alpha+\beta$)-области [11].

Определение характеристик при испытаниях на растяжение

Проведены испытания на растяжение при температуре 20 °С образцов, изготовленных из крупногабаритных полуфабрикатов из титанового сплава ВТ6ч. Результаты испытаний представлены в табл. 1.

Профиль и штамповка из титанового сплава ВТ6ч с окончательной деформацией в β -области обеспечивают более высокий уровень прочностных характеристик при более низком уровне пластичности в сравнении с поковкой из титанового сплава ВТ6ч.

Что касается сравнения значений свойств по профилю и штамповке, то штамповка обеспечивает более высокий уровень прочности при более низких значениях пластичности. Это связано с тем, что на штамповке получена

Таблица 1

Результаты испытаний на растяжение (средние значения)

Вид полуфабриката	Направление вырезки образца	$\sigma_{0,2}$	σ_b	δ_5	ψ
		МПа		%	
Профиль	В	867	914	11,3	24,1
	Д	872	917	11,7	25,2
	П	855	904	11,0	24,4
Штамповка	Д	888	936	8,8	19,2
	П	914	946	7,7	19,3
Поковка	В	858	910	13,0	30,0
	Д	860	890	14,8	37,5
	П	870	908	12,3	37,0

структура с более крупными β -зернами, что объясняет меньшие значения по пластичности и большие значения по прочности.

Определение ударной вязкости KCU

Проведены испытания на ударную вязкость KCU при температуре 20 °С образцов, изготовленных из крупногабаритных полуфабрикатов из титанового сплава ВТ6ч. Результаты испытаний представлены в табл. 2.

Профиль из титанового сплава ВТ6ч с окончательной деформацией в β -области обеспечивает схожий уровень характеристик ударной вязкости в сравнении с поковкой из титанового сплава ВТ6ч.

На образцах из штамповки получены наименьшие значения ударной вязкости. Микроструктура штамповки представлена наиболее крупными β -зернами (в сравнении с

профилем), что обеспечивает более высокий уровень прочности, а также более низкий уровень пластичности, что объясняет получение более низких значений ударной вязкости.

Определение характеристик при испытаниях на МЦУ

Испытания на малоцикловую усталость при температуре 20 °С образцов типа «полоса с отверстием» ($K_f=2,6$), изготовленных из крупногабаритных полуфабрикатов титанового сплава ВТ6ч, проводили при $f=60$ Гц, $R_\sigma=0,01$.

Испытания на малоцикловую усталость при 20 °С образцов типа «проушина» ($K_f=3,2$), изготовленных из крупногабаритных полуфабрикатов титанового сплава ВТ6ч, проводили при $f=3-5$ Гц, $R_\sigma=0,01$.

Результаты испытаний представлены в табл. 3.

Таблица 2

Результаты испытаний на определение ударной вязкости (средние значения)

Вид полуфабриката	Направление вырезки образца	KCU, Дж/см ²
Профиль	Д	65,0
	П	62,2
Штамповка	Д	50,8
	П	51,0
Поковка	Д	63,7
	П	58,6

Таблица 3

Результаты испытаний на малоцикловую усталость образцов из профиля, штамповки и поковки (средние значения)

Вид полуфабриката	Направление вырезки образца	Напряжение $\sigma_{\text{нетто}}$, МПа	Число циклов до разрушения, цикл
Образцы типа «полоса с отверстием» ($K_f=2,6$)			
Профиль	П	274,4	162920
Штамповка	Д		174030
Поковка	Д		215530
Образцы типа «проушина» ($K_f=3,2$)			
Профиль	П	196	169110
Штамповка	Д		175885
Поковка	Д		324500

Поковка из титанового сплава ВТ6с с окончательной деформацией в $(\alpha+\beta)$ -области с глобулярной мелкозернистой структурой обеспечивает более высокий уровень значений МЦУ как на образцах типа «полоса с отверстием», так и на образцах типа «проушина» в сравнении с профилем и штамповкой из титанового сплава ВТ6с.

Следует отметить, что на характеристики усталости титановых сплавов наряду с различными металлографическими факторами, к которым относится и структура, влияют также и условия испытаний: программа и схема нагружения, частота и амплитуда испытаний, величина концентраторов [12]. Такое многообразие параметров, от которых зависит циклическая прочность титановых сплавов, затрудняет оценку влияния структуры и часто приводит к спорным результатам. В научно-технической литературе также отмечается перспектива достижения на образцах материала с β -структурой схожих с $(\alpha+\beta)$ -структурой значений МЦУ при достижении определенных размеров зерна [13].

Определение вязкости разрушения (K_{Ic} , K_Q)

Проведены испытания на вязкость разрушения (K_{Ic} , K_Q) при температуре 20 °С образцов, изготовленных из крупногабаритных полуфабрикатов титанового сплава ВТ6с. Результаты испытаний представлены в табл. 4.

Профиль и штамповка из титанового сплава ВТ6с с окончательной деформацией в β -области обеспечивают существенно более высокий уровень вязкости разрушения (K_{Ic} , K_Q) по сравнению с поковкой из титанового сплава ВТ6с.

Разница в уровне значений вязкости разрушения (K_{Ic} , K_Q) в зависимости от типа полуфабриката обусловлена различным структурным состоянием (пластинчатая структура –

профиль и штамповка; глобулярная структура – поковка), сформированным вследствие применения различных температурно-деформационных режимов обработки на технологических стадиях изготовления полуфабрикатов [14].

Необходимо отметить, что полуфабрикаты, технология изготовления которых предусматривает окончательную деформацию в β -области, ожидаемо показали не только гораздо более высокий, но и более стабильный уровень значений вязкости разрушения.

Вероятно, это объясняется более резким изменением движения трещин в пластинчатой структуре по сравнению с глобулярной, что связано с влиянием границ первичных β -зерен и α -колоний, а также их ветвлением с образованием вторичных трещин. Происходящее в результате этих процессов увеличение общей длины трещины требует большей энергии и включает большие объемы металла в работу пластической деформации [15]. Следовательно, увеличение доли пластинчатой α -фазы в смешанной глобулярно-пластинчатой структуре путем повышения температуры деформации до температуры $(\alpha+\beta)\rightleftharpoons\beta$ -перехода вызывает увеличение параметров вязкости разрушения.

Для увеличения значений вязкости разрушения до максимально возможных необходимо, чтобы α -пластины, кроме того, были короткими и близко расположенными, чтобы вызвать частые изменения направления движения растущей трещины.

Что касается анизотропии характеристик вязкости разрушения и других механических свойств, то ее развитию способствует снижение температуры деформации и последующей термической обработки, увеличение степени деформации, а также деформация по схеме, при которой происходит преимущественно однонаправленное течение металла.

Таблица 4

Результаты испытаний на вязкость разрушения (K_{Ic} , K_Q) образцов из профиля, штамповки и поковки (средние значения)

Вид полуфабриката	Направления вырезки образца и нагружения	K_Q , МПа $\sqrt{м}$	K_{Ic} , МПа $\sqrt{м}$
Профиль	ДП	128	121*
	ПД	130	–
Штамповка	ДП	125	122**
	ПД	119	119
	ВД	117	111**
Поковка	ДП	89	89
	ПД	86	86
	ВД	105	105

* Значение K_{Ic} получено на одном образце из шести испытанных.

** Значение K_{Ic} получено на одном образце из двух испытанных.

Обсуждение и заключения

Сплав ВТ6ч является наиболее применимым титановым сплавом для изготовления широкой номенклатуры элементов конструкции гражданских и военных отечественных самолетов. Аналогичное утверждение справедливо для его иностранного аналога – сплава Ti-6-4 и его модификаций [16]. Причиной является сочетание сбалансированного химического состава, стабильно достигаемого комплекса механических свойств, а также технологичности, в том числе при горячей деформации, что обеспечивает возможность изготовления крупногабаритных полуфабрикатов.

В настоящее время заключительная деформация в β -области применяется в исключительных случаях для обеспечения выполнения требований по достижению геометрических параметров крупногабаритных полуфабрикатов. Из приведенных ранее результатов исследований видно, что формируемая при деформации в β -области пластинчатая структура может обеспечивать достижение механических свойств на уровне комплекса свойств, присущего глобулярной структуре, сформированной при заключительной деформации в $(\alpha+\beta)$ -области. В то же время значения вязкости разрушения полуфабрикатов с пластинчатой структурой значительно выше.

Однако механические свойства полуфабрикатов с пластинчатой структурой крайне зависимы от размеров структурных составляющих – размеров первичных β -зерен и коло-

ний α -пластин. Особенно это заметно для характеристик пластичности.

В этой связи актуальным является проведение исследований по определению требований к β -структуре, выполнение которых позволит обеспечить стабильное достижение необходимых значений механических свойств. Это в свою очередь расширит области применения β -деформации и даст возможность чаще применять данный технологический прием для выполнения требований конструкторов к перспективным образцам авиационной техники.

За рубежом для формирования β -структуры полуфабрикатов из сплавов-аналогов ВТ6ч активно применяется термическая обработка с нагревом в β -область, при этом заключительная деформация проводится в $(\alpha+\beta)$ -области. В некоторых случаях β -термическая обработка считается более предпочтительной, чем β -деформация, что связывают с равномерностью формирования структуры. При этом в отечественном производстве данный подход до настоящего времени не получил достаточного развития. Это обуславливает необходимость проведения комплексных работ по разработке технологии β -термической обработки и технологии предварительной деформационной обработки.

Благодарности

Авторы статьи выражают благодарность за участие в проведенной работе специалистам ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» и ПАО «Туполев».

Библиографический список

1. Глазунов С.Г., Моисеев В.Н. Конструкционные титановые сплавы. М.: Металлургия, 1974. 368 с.
2. Хорев А.И. Основные научные и практические направления повышения стабильности механических свойств $(\alpha+\beta)$ -титановых сплавов высокой и сверхвысокой прочности // Ti-2010 в СНГ. Екатеринбург, 2010. С. 227–235.
3. Ильин А.А., Колачев Б.А., Польшин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства: справочник. М.: ВИЛС–МАТИ, 2009. 520 с.
4. Каблов Е.Н., Гриневич А.В., Ерасов В.С. Характеристики прочности металлических авиационных материалов и их расчетные значения // 75 лет. Авиационные материалы. М.: ВИАМ, 2007. С. 370–379.
5. 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 ВТ23 // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2018. №1 (61). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.07.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-1-7-7.
6. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // Крылья Родины. 2016. №5. С. 8–18.
7. Арисланов А.А., Гончарова Л.Ю., Ночовная Н.А., Гончаров В.А. Перспективы использования титановых сплавов в слоистых композиционных материалах // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2015. №10. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.07.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-10-4-4.
8. Каблов Е.Н. ВИАМ: продолжение пути // Наука в России. 2012. №4. С. 7–11.
9. Путьрский С.В., Яковлев А.Л., Ночовная Н.А., Крохина В.А. Исследование влияния различных режимов термической обработки на свойства полуфабрикатов и сварных соединений из сплава ВТ22М // Авиационные материалы и технологии. 2019. №1 (54). С. 3–10. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-3-10.

10. 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.
11. 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.
12. Борисова Е.А., Бочвар Г.А., Брун М.Я. и др. *Металлография титановых сплавов*. М.: *Металлургия*, 1980. С. 246–260.
13. Золоторевский В.С. *Механические свойства материалов: учеб. для вузов*. 2-е изд. М.: *Металлургия*, 1983. 352 с.
14. Арисланов А.А., Путьрский С.В., Яковлев А.Л., Грибков М.С. Исследование структуры и механических свойств сварных соединений из сплава ВТ6ч // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. №4 (57). С. 74–79. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-74-79.
15. Inagaki I., Shirai Y., Takechi T., Ariyasu N. *Application and Features of Titanium for the Aerospace Industry*. Osaka: *Nippon Steel & Sumitomo Metal*, 2014. P. 22–27.
16. Peters M., Kumpfert J., Ward C.H., Leyens C. *Titanium Alloys for Aerospace Applications // Advanced Engineering Materials*. 2003. Vol. 5. P. 419–427.