УДК 669.295

DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s5-81-88

B.C. Калашников l , O.C. Кашапов l , T.B. Павлова l , A.P. Истракова l

ИССЛЕДОВАНИЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СПЛАВА ВТ41, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЭЛС

Исследованы прочностные характеристики сварных соединений жаропрочного титанового псевдо-асплава BT41. Методом электронно-лучевой сварки получены сварные соединения из сплава BT41. На образцах, термически обработанных по нескольким режимам, проведены испытания прочностных характеристик при различных температурах. Проведен анализ структуры сварного соединения методами оптической металлографии. Предложены режимы полного и неполного отжига для деталей из сплава BT41.

Ключевые слова: титановые сплавы, электронно-лучевая сварка, термическая обработка, микроструктура, механические свойства, жаропрочность.

Strength characteristics of electron beam welded joints made of VT41 high-temperature near-a-titanium alloy were studied. The welded joints of VT41 alloy were made by the electron beam welding technique. Strength characteristics of VT41 welded joints subjected to different modes of heat treatment were measured at various temperatures. The microstructure studies of welded joints were carried out via optical metallography. Conditions for full and partial annealings of VT41 alloy parts have been proposed.

Keywords: titanium alloys, electron beam welding, heat treatment, microstructure, mechanical properties, heat esistance.

Введение

К каждому следующему поколению современной авиакосмической техники предъявляются все более жесткие требования по условиям эксплуатации. Разработка и внедрение новых материалов [1-7], применяемых в газотурбинных двигателях (ГТД), для повышения ресурса и надежности деталей в изделиях ГТД требуют подбора оптимального режима термомеханической обработки (ТМО) [8, 9] для обеспечения высокого уровня эксплуатационных свойств материала детали. Особое место среди материалов для создания ГТД занимают жаропрочные титановые сплавы, используемые для изготовления деталей компрессора с рабочими температурами до 450-600°C. Одной из типовых технологических операций изготовления деталей и узлов компрессора является сварка. В этой связи освоение технологии получения сварных соединений из новых титановых сплавов является одним из необходимых условий для их внедрения в промышленность. Можно отметить, что в целом вопрос о применении сварных деталей и узлов при изготовлении изделий авиационной и космической техники остается весьма актуальным. Применение сварных деталей и узлов позволяет повысить коэффициент использования материала и снижает трудоемкость технологических процессов [10–16].

Известно, что наиболее распространенным видом сварки титановых сплавов является аргонодуговая сварка. Однако для наиболее ответствен-

ных деталей и узлов ГТД (ротор компрессора, корпусные детали, ремонт поврежденных лопаток) предпочтительным типом сварки [17-20] является электронно-лучевая сварка (ЭЛС), которая обладает высокими техническими возможностями и используется в различных областях промышленности для сварки тонкостенных и толстостенных элементов. Незначительные деформации в процессе сварки, наличие узкого шва с глубоким проплавлением, высокое качество производимого в вакууме соединения, а также возможность соединения разнородных материалов делают ЭЛС наиболее предпочтительной при конструировании узлов и деталей ГТД [17]. Однако после операции ЭЛС требуется последующая термическая обработка для снятия внутренних напряжений [21] и повышения прочностных характеристик сварного соединения до уровня 0,8-0,95% от прочности основного материала.

В данной статье исследуются сварные соединения жаропрочного псевдо-α-сплава ВТ41, выполненные методом электронно-лучевой сварки. Как известно, К достоинствам псевдо-αтитановых сплавов можно отнести высокую технологичность в металлургическом производстве (небольшое содержание тугоплавких легирующих элементов) [22], хорошую свариваемость различными видами сварки (небольшое содержание стабильной β-фазы в сварном соединении и основном материале) [23-25] и высокие рабочие температуры (до 600°С) по сравнению с

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

(α+β)-титановыми сплавами. Однако при сварке титана возникают различные затруднения из-за высокой химической активности материала при повышенной температуре и склонности к росту зерна, а также наличия фазовых превращений при термическом цикле сварки (большие скорости нагрева и охлаждения при доведении до температуры плавления и комнатной температуры) [26–32]. При этом присутствие в качестве легирующего элемента кремния может накладывать определенные ограничения на режим сварки.

Целью данной работы является выбор оптимального режима послесварочной термической обработки (ПСТО) сварных соединений жаропрочного титанового псевдо-α-сплава ВТ41, полученных методом ЭЛС, обеспечивающих прочность сварного соединения на уровне 0,8–0,95% от прочности основного материала.

Материалы и методы

Объектом исследования являются образцы сварных соединений из перспективного жаропрочного высокопрочного псевдо- α -титанового сплава BT41 системы Ti–Al–Sn–Zr–C+ β -стабилизаторы (химический состав по ОСТ1 90013).

Для получения сварных соединений сплава ВТ41 из катаного прутка путем осадки на прессе при температурах (α + β)-области получены полосы длиной 300—350 мм и толщиной 22 мм, которые подвергали термической обработке по режиму двойного отжига и последующей механической обработке. Далее методом ЭЛС получены сварные соединения и подвергнуты отжигу для снятия послесварочных напряжений. Сварку проводили на промышленном оборудовании в вакууме по типичному для титановых сплавов режиму.

Структуру материала исследовали ПИ1.2.785-09 «Металлографический анализ титановых сплавов». Определение механических свойств осуществляли по стандартным методикам (ГОСТ 1497, ΓOCT 9454, ГОСТ ГОСТ 10145). Образцы сварных соединений и образцы-свидетели отжигали по различным режимам в вакуумной печи (табл. 1). Сварные соединения и образцы-свидетели (образец основного материала, термобработанный в одной садке с образцом сварного соединения) подвергали термической обработке по режиму полного отжига при температуре выше температуры начала рекристаллизации, но ниже температуры полного полиморфного превращения, и по режиму неполного отжига – в интервале температур от 550 до 700°C, когда процесса рекристаллизации не происходит. Скорость охлаждения термосадки в вакуумной печи до 100°C составила ~ 18 °C/мин.

Образцы подвергали испытанию на растяжение при комнатной и повышенной температурах на разрывных машинах ИР 5113 (кратковременная прочность) и ZST 2/3-ВИЭТ (длительная прочность). После проведения испы-

таний на растяжение на образцах сварных соединений, проявивших прочностные свойства на уровне 0,8–0,95% от прочности основного материала, проведены следующие исследования:

- на микроскопе Versamet изучены микроструктуры соответствующих сварных соединений;
- на маятниковом копре МК-05 измерена энергия удара при комнатной температуре;
- на твердомере ТК-2 по шкале Викерса измерена твердость в околошовной зоне (ОЗ), зоне термического влияния (ЗТВ) и в самом шве (Ш).

Результаты и обсуждение

Методом ЭЛС изготовлены образцы сварных соединений из полуфабриката сплава BT41 в виде полосы толщиной 18 мм. Получившееся сварное соединение представлено на рис. 1. Ширина шва в литниковой части составила ~6 мм, в донной ~3,5 мм, глубина шва 17 мм, а ширина зоны термического влияния ~2,5 мм.

Результаты испытаний на кратковременную и длительную прочность при повышенной и комнатной температурах образцов, выполненных ЭЛС, и образцов-свидетелей представлены в табл. 2 и 3.

На рис. 2 и 3 представлено сравнение соответственно предела прочности при растяжении при комнатной и повышенной (600°С) температурах основного материала образца-свидетеля и материала сварного соединения при различных режимах ПСТО.

На рис. 4 представлено сравнение значений длительной прочности при температуре 600°C основного материала образца-свидетеля и материала сварного соединения при различных режимах ПСТО.

Видно, что после растяжения сварных образцов и образцов-свидетелей лучшие свойства продемонстрировали образцы, термообработанные по режимам ПСТО: 3 и 5.

Теромообработка по схеме полного (двойного) отжига по режиму *3* ПСТО обеспечивает высокие значения пластичности при незначительном разупрочнении основного материала. Кроме того, сварные соединения, обработанные по этому режиму, обладают наибольшей долговечностью при испытаниях на длительную прочность.

Рассмотрим влияние режимов неполного отжига на механические свойства. С повышением температуры неполного отжига с 600 до 700°С происходит снижение характеристик пластичности при одновременном повышении прочности основного материала и сварного соединения при испытаниях на растяжение при комнатной температуре. Наилучшим сочетанием прочностных характеристик и длительной прочности обладают образцы после неполного отжига при температуре 650°С (ПСТО: 5).

Результаты испытаний на KCU показали, что ударная вязкость для режима 3 сварного соединения составила 189 кДж/см^2 , а основного материа-

Таблица 1

Режимы послесварочной термической обработки (ПСТО)

Условный номер режима ПСТО	Режим ПСТО
1	Без термической обработки
2	Полный отжиг при температуре 920°C
3	Полный отжиг – вторая ступень при температуре 620°C
	Неполный отжиг при температуре, °С:
4	600
5	650
6	700

Таблица 2 Результаты испытаний на кратковременную прочность (минимальные значения) при комнатной температуре образцов-свидетелей и образцов, выполненных ЭЛС, из титанового сплава ВТ41

Parroy IICTO	$\sigma_{\scriptscriptstyle B}$	$\sigma_{\scriptscriptstyle B.CB}$	δ	Ψ
Режим ПСТО	МПа		%	
Без ПСТО	1095	1155	16	28
Полный отжиг при 920°C	1035	1075	16	30
Полный отжиг – вторая ступень при 620°C	1085	1125	13	30
Неполный отжиг при температуре, °C:				
600	_	1195	14	29
650	1165	1185	10	20
700	1165	1175	9	16

Таблица 3 Результаты испытаний образцов-свидетелей на кратковременную и длительную прочность (минимальные значения)

Режим ПСТО	$\sigma_{\mathtt{B}}^{600^{\circ}}$	$\sigma_{\mathrm{B.CB}}^{600^{\circ}}$	δ ^{600°}	ψ ^{600°}		прочность, ч, о=275 МПа
	МПа		%		τ	$ au_{\scriptscriptstyle \mathrm{CB}}$
Без ПСТО	675	725	21	50	200	53
Полный отжиг при 920°C	635	615	20	45	92	_
Полный отжиг – вторая ступень при 620°C	625	655	20	45	116	94
Неполный отжиг при температуре, °С:						
600	_	715	_	_	_	66
650	685	715	20	57	214	86
700	685	705	17	51	186	68

Таблица 4 Сравнительные свойства* сварных ЭЛС-соединений сплавов ВТ41 и ВТ18У после различных режимов ПСТО

Сплав Режим ПСТО	$\sigma_{\mathrm{B}}^{20^{\circ}}$ $\sigma_{\mathrm{B}}^{600^{\circ}}$ $\sigma_{50}^{600^{\circ}}$			<i>КС</i> U, кДж/см²	
BT41	3 5	≥1085/≥1125 ≥1165/≥1185	≥625/≥655 ≥685/≥715	275/275 275/275	245/189 221/117
BT18Y	Отжиг при 900°С	≥920/≥1065	≥560/≥650	(275–310)/(235–275)	274/205

^{*} В числителе значения для основного металла, в знаменателе – для сварного соединения.

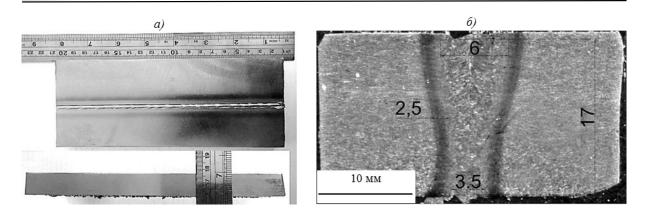


Рис. 1. Образец сварного соединения из сплава BT41 (a) и увеличенное изображение стыкового сварного соединения (δ)

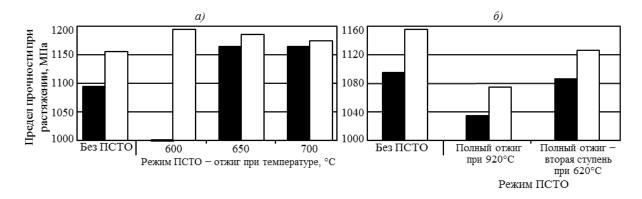


Рис. 2. Сравнение предела прочности при растяжении при комнатной температуре основного материала образца-свидетеля (\blacksquare) и материала сварного соединения (\square) при различных режимах ПСТО: неполного (a) и полного отжига (δ)

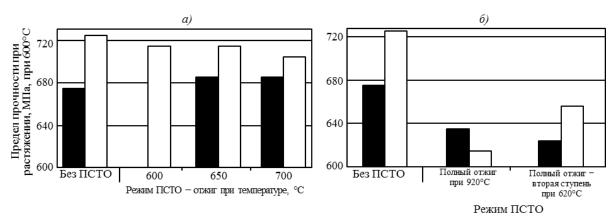


Рис. 3. Сравнение предела прочности при растяжении при температуре 600° С основного материала образцасвидетеля (\blacksquare) и материала сварного соединения (\square) при различных режимах ПСТО: неполного (a) и полного отжига (δ)

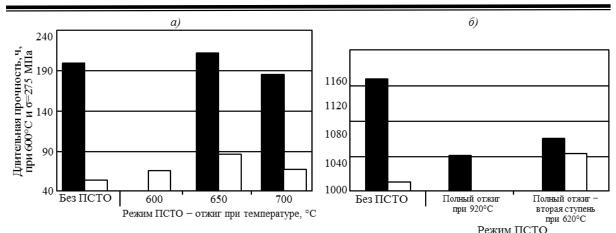


Рис. 4. Сравнение значений длительной прочности при температуре 600° С основного материала образцасвидетеля (\blacksquare) и материала сварного соединения (\square) при различных режимах ПСТО: неполного отжига (δ)

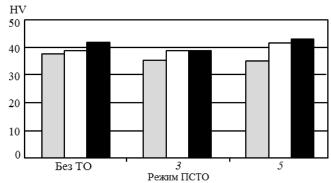


Рис. 5. Сравнение значений твердости сварного соединения при выбранных режимах ПСТО:

— основной металл;
— зона термического влияния;
— шов

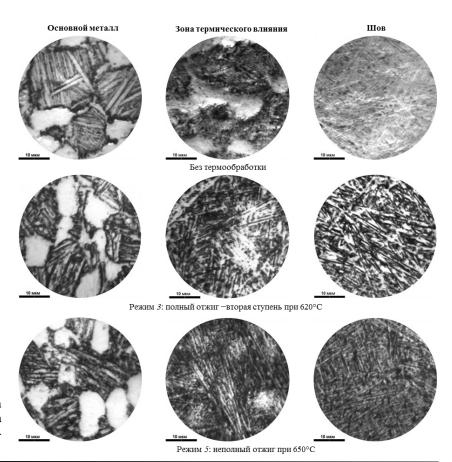


Рис. 6. Влияние режима термообработки (ПСТО) на структуру сварного соединения сплава ВТ41

ла 245 кДж/см 2 . Для режима 5 ударная вязкость сварного соединения составила 117 кДж/см 2 , а основного материала 221 кДж/см 2 .

Результаты измерения твердости в зоне сварного шва (Ш), зоне термического влияния (ЗТВ) и в основном материале (ОМ) представлены на рис. 5.

Результаты измерения твердости сварного соединения подтверждают результаты исследования микроструктуры, а именно — для режима полного отжига (3) твердость в зоне материала шва и зоне термического влияния одинаковая и составляет 39 ед. по шкале Викерса.

На установке PSB 10 определены значения малоцикловой усталости при комнатной температуре. Результаты испытаний по мягкому циклу для базы в 10^4 циклов показывают, что для режима 3 ПСТО – МЦУ: $\sigma_{0,1}$ =1020 МПа, а для режима 5 ПСТО – МЦУ: $\sigma_{0,1}$ =1060 МПа. При этом сварное соединение, обработанное по режимам 3 и 5 ПСТО, обладает значениями МЦУ на уровне основного материала (1040 МПа) и прочности – не ниже чем 0,95 от прочности основного материала.

Микроструктуру исследовали на образцах сварных соединений, обработанных по режимам 3 и 5 ПСТО. На рис. 6 представлены микроструктуры нетермообработанного стыкового ЭЛС-соединения и обработанных по режимам 3 и 5 ПСТО.

Структура материала в месте сварного шва, зоны термического влияния и основного материала для обоих режимов однотипная и представляет собой пластинчатую структуру (для материала шва), смесь глобулярно-пластинчатой и пластинчатой (зона термического влияния) и глобулярно-пластинчатую (для основного материала), аналогичные структурам сварного соединения до проведения ПСТО соответственно (см. рис. 6).

При этом параметры структуры для каждого участка сварного соединения при полном и неполном отжиге различаются.

После полного отжига (ПСТО: режимы 2 и 3) по сравнению с исходным состоянием и неполным отжигом наблюдается увеличение диаметра частиц первичной α -фазы, толщины пластин вторичной α -фазы и превращенных α -пластин в сварном шве. Во всех зонах несколько увеличивается толщина прослойки β -фазы. Межфазные границы становятся более четкими. Необходимо отметить, что полный отжиг и замедленное охлаждение в вакуумной печи способствуют разупрочнению основных твердых растворов за счет дополнительного выделения силицидов.

Влияние ПСТО по режиму 3 на материал сварного шва заключается в незначительном увеличении толщины α -пластин, что обусловлено процессами диффузии, приводящими к стабилизации твердых растворов α - и β -фаз и более четкому выявлению межфазных границ после травления.

Наиболее близким аналогом по применению жаропрочного титанового сплава BT41 является псевдо-α-сплав BT18У. Сравнение их прочност-

ных характеристик представлено в табл. 4. Видно, что прочностные характеристики сварных соединений из сплава ВТ41 не уступают, а где-то даже и превосходят характеристики сварных соединений из сплава ВТ18У.

Испытания показали, что особенностью полного (двойного) отжига является разупрочнение основного материала при испытаниях на растяжение и длительную прочность при температуре 600°С. Коэффициент разупрочнения основного материала по кратковременной прочности составляет 0,92, сварного соединения 0,97 от исходного значения, при испытаниях на длительную прочность 0,87 для основного материала и сварного соединения. Прочность основного материала и сварного соединения при комнатной температуре практически не изменяется.

После неполного отжига не происходит разупрочнения основного материала и сварного соединения как при 20°С, так и при 600°С. Длительная прочность основного материала практически не изменяется, при этом длительная прочность сварного соединения снижается до уровня 0,87 от исходного значения.

Заключение

Таким образом, на основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

- Впервые получены сварные соединения из нового перспективного высокопрочного жаропрочного титанового сплава ВТ41 и проведено сравнительное исследование структуры и свойств материала образца-свидетеля и материала сварного соединения.
- Определено, что наиболее оптимальными режимами ПСТО являются:
- полный (двойной) отжиг обеспечивает высокие значения характеристик пластичности при 20°С и длительной прочности при 600°С; приводит к разупрочнению основного материала на уровне 0,92 от исходного состояния при температуре испытания 600°С;
- неполный отжиг при 650°С обеспечивает максимальную прочность сварного соединения и основного материала (без разупрочнения) при сохранении высоких характеристик пластичности основного материала при комнатной температуре и длительной прочности при 600°С.
- Показано, что после режима $3~\Pi$ CTO (полный двойной отжиг) прочностные свойства стыкового сварного ЭЛС-соединения повышаются и материал сварного соединения обладает механическим свойствами на уровне: $\sigma_{_{\rm B}}^{20^\circ} \ge 1125~{\rm M\Pi a};$ $\sigma_{_{\rm B}}^{600^\circ} \ge 655~{\rm M\Pi a};$ $\sigma_{_{\rm S}0}^{600^\circ} = 275~{\rm M\Pi a};$ а основной материал: $\sigma_{_{\rm B}}^{20^\circ} \ge 1085~{\rm M\Pi a};$ $\sigma_{_{\rm S}0}^{600^\circ} \ge 625~{\rm M\Pi a};$ $\sigma_{_{\rm S}0}^{600^\circ} = 275~{\rm M\Pi a}.$ Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о хорошей свариваемости сплава BT41, прочность сварного соединения которого не ниже 0,8 от прочности основного материала.

— Определено, что после режима 5 ПСТО (неполный отжиг) прочностные свойства стыкового сварного ЭЛС-соединения повышаются и материал сварного соединения обладает механическим свойствами на уровне: $\sigma_{_{\rm B}}^{20^{\circ}} \geq 1185~{\rm M\Pi a};$ $\sigma_{_{\rm B}}^{600^{\circ}} \geq 715~{\rm M\Pi a};$ $\sigma_{_{\rm S}}^{600^{\circ}} = 275~{\rm M\Pi a};$ а основной материал: $\sigma_{_{\rm B}}^{20^{\circ}} \geq 1165~{\rm M\Pi a};$ $\sigma_{_{\rm B}}^{600^{\circ}} \geq 685~{\rm M\Pi a};$

 $\sigma_{50}^{600^{\circ}}$ =275 МПа, что также свидетельствует о высоком уровне свойств сварного материла (не ниже 0,8 от прочности основного материала) и возможности проведения ПСТО по схеме неполного отжига, что существенно облегчает технологический процесс изготовления детали.

ЛИТЕРАТУРА

- Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.
- 2. Хорев А.И., Белов С.П., Глазунов С.Г. Металловедение титана и его сплавов. М.: Металлургия. 1992. 352 с.
- Кашапов О.С., Павлова Т.В., Ночовная Н.А. Влияние режимов термической обработки на структуру и свойства жаропрочного титанового сплава для лопаток КВД //Авиационные материалы и технологии. 2010. №2. С. 8–14.
- Ночовная Н.А., Панин П.В. Анализ остаточных макронапряжений в сварных соединениях титановых сплавов разных классов //Труды ВИАМ. 2014. №5. Ст. 02 (viam-works.ru).
- Ерасов В.С., Яковлев Н.О., Нужный Г.А. Квалификационные испытания и исследования прочности авиационных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 440–448.
- Моисеев В.Н. Высокопрочные титановые сплавы для авиакосмической техники /В кн. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2002. Юбилейный науч.-технич. сб. /Под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: МИСиС–ВИАМ. 2002. С. 115–121.
- Каблов Е.Н. Материалы для изделия «Буран» инновационные решения формирования шестого технологического уклада //Авиационные материалы и технологии. 2013. №S1. С. 3–9.
- 8. Кашапов О.С., Новак А.В., Ночовная Н.А., Павлова Т.В. Состояние, проблемы и перспективы создания жаропрочных титановых сплавов для деталей ГТД //Труды ВИАМ. 2013. №3. Ст. 02 (viam-works.ru).
- 9. Способ термической обработки высокопрочных $(\alpha+\beta)$ -титановых сплавов: пат. 2465366 Рос. Федерация; опубл. 15.09.2011.
- Zhiyong Chen, Jinwei Li, Jie Liu et al. Creep Behavior of Fusion Zone and Base Metal of the Electron Beam Weldments of a Near-alpha Titanium Alloy //J. Mater. Sci. Technol. 2010. V. 26 (6). P. 564–571.
- Ханжин А.В., Федоров А.М., Сахаров И.Ю. Разработка нестандартного сварного соединения и выбор режимов сварки при изготовлении узлов из титановых сплавов //Вопросы материаловедения. 2011. №2. С. 117–122.
- Кудрявцев А.С., Паноцкий Д.А. Исследование характеристик вязкости разрушения высокопрочных свариваемых псевдо-α-титановых сплавов применительно к изделиям морской техники //Титан. 2010. №2. С. 9–15.

- 13. Microstructural factors determining mechanical properties of laser welded Ti-4,5Al-2,5Cr-1,2Fe-0,1C for use in next-generation aircraft //Materials Science and Engineering. A. 2012. V. 550. P. 55-65.
- 14. Кудрявцев А.С., Козлова И.Р., Иванова Л.А., Чудаков Е.В. Материаловедческое обеспечение производства колец из свариваемых высокопрочных титановых сплавов для деталей энергомашиностроения //Титан. 2013. №2. С. 29–31.
- Иванова Л.А., Кудрявцев А.С., Травин В.В. Основы использования свариваемых псевдо-альфа титановых сплавов в паротурбиностроении //Титан. 2011.
 №2. С. 37–47.
- Тригуб Н.П., Березос В.А., Крыжановский В.А., Корнийчук В.Д. Производство крупногабаритных дисков газотурбинных установок из жаропрочного сплава титана, полученного методом электроннолучевой плавки //Титан. 2012. №3. С. 28–35.
- 17. Горынин И.В., Кудрявцев А.С., Орыщенко А.С. Основные аспекты создания высокопрочных свариваемых титановых сплавов для морской техники //Титан. 2011. №1. С. 30–35.
- 18. Кузнецов С.В., Михайлов В.И., Сахаров И.Ю., Хатунцев А.Н. Сварка и исправление дефектов соединений титановых сплавов больших толщин электронным лучом //Титан. 2009. №4. С. 40–45.
- Овчинников А.В. Применение титановых сплавов с субмикрокристаллической структурой для восстановления деталей роторной части ГТД //Автоматическая сварка. 2012. №2. С. 21–25.
- 20. Овчинников А.В. Применение материаловедческого подхода для восстановления лопаток вентилятора из ВТ3-1 //Вестник двигателестроения. 2013. №1. С. 143–147.
- Azar P., Ping Li, Patnaik P.C. et al. Electron beam weld repair and qualification of titanium fan blades for military gas turbine engines /In: RTOAVT Workshop on Cost effective Applications of titanium alloys in military platforms. Loen, Norway. NATO. 2001. P. 141–153.
- Способ термомеханической обработки изделий из титановых сплавов: пат. 2457273 Рос. Федерация; опубл. 05.04.2011.
- Горынин И.В., Кудрявцев А.С., Ушков С.С. и др. Опыт изготовления слитков массой до 17 тонн из псевдо-альфа сплавов //Титан. 2013. №2. С. 23–28.
- 24. Горынин И.В., Ушков С.С., Баранов А.В., Михайлов В.И., Ушаков Б.Г. Титановые сплавы для конструкций морского применения //Морские интеллектуальные технологии. 2009. №4. С. 61–66.

- 25. Mateo A., Corzol M., Angladal M. et al. Welding repair by linear friction in titanium alloys //Materials Science and Technology. 2009. V. 25. №7. P. 905–913.
- 26. Лясоцкая В.С., Князева С.И. Ступенчатый отжиг сварных соединений титановых сплавов //Заготовительные производства в машиностроении. 2012. №11. С. 32–34.
- 27. Гнюсов С.Ф., Клименов В.А., Алхимов Ю.В. и др. Формирование структуры титана и корозионностой-кой стали при лазерной сварке //Сварочное производство. 2012. №1. С. 17–22.
- 28. Pederson R., Niklasson F. et al. Microstructure and mechanical properties of friction- and electron-beam welded Ti-6Al-4V and Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo //Materials science and engineering. A. 2012. V. 552. P. 555-565.
- 29. Wei Li, Yaowu Shi, Yongping Lei, Xiaoyan Li. Effect of electron beam welding on the mi-crostructures and mechanical properties of thick TC4-DT alloy //Materials and design. 2012. V. 34. P. 509–515.
- Suresh D. Meshram, T. Mohandas. A comparative evaluation of friction and electron beam welds of near-α titanium alloy //Materials and design. 2010. V. 31. P. 2245–2252.
- 31. Гнюсов С.Ф., Оришич А.М. Структурно-фазовое состояние и механические свойства сварных соединений при лазерной сварке титана и нержавеющей стали //Известия Томского политехнического университета. 2012. Т. 321. №2. С. 94–99.
- 32. Скворцова С.В., Попова Ю.А., Панин П.В., Грушин И.А., Курышев Е.А. Влияние термической обработки на структуру и свойства сварных соединений из титанового сплава ВТ23 //Титан. 2011. №2. С. 16–21.