



УДК 621.791.1

**СВАРКА ПЛАВЛЕНИЕМ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ18У**

В.И. Лукин

*доктор технических наук*

Е.Н. Иода

М.Д. Пантелеев

А.А. Скупов

**Май 2015**

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

## СВАРКА ПЛАВЛЕНИЕМ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT18U

*Исследовано влияние состава присадочного материала и режима термообработки на механические свойства, уровень остаточных напряжений, структурные особенности и характер разрушения сварных соединений полуфабрикатов (листов и плит) из жаропрочного псевдо- $\alpha$ -титанового сплава, выполненных автоматической аргоно-дуговой и электронно-лучевой сваркой. Проведен анализ влияния ультразвуковой ударной обработки (УУО) сварных соединений на характеристики малоциклового усталости. Установлено, что УУО обеспечивает повышение усталостных характеристик более чем в 6 раз.*

**Ключевые слова:** *сварка, присадочный материал, автоматическая аргоно-дуговая электросварка, электронно-лучевая сварка, металлографический анализ, ультразвуковая ударная обработка.*

V.I. Lukin, E.N. Ioda, M.D. Panteleev, A.A. Skupov

## FUSION WELDING OF VT18U TITANIUM ALLOY

*An effect of filler material composition and conditions of heat treatment on mechanical properties, the level of residual stresses, structural features and the nature of fracture of welded joints of semiproducts (sheets and plates) from near  $\alpha$ -titanium alloy made by automatic argon tungsten-arc welding and electron-beam welding was investigated. An influence of ultrasonic impact treatment (UIT) of welded joints on LCF characteristics was analyzed. It was established that UIT provides an improvement of fatigue characteristics more than 5 times.*

**Keywords:** *welding, filler material, automatic argon tungsten-arc welding, electron-beam welding, metallographic analysis, ultrasonic impact treatment.*

---

<sup>1</sup>Федеральное 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

Эффективность применения титановых сплавов в промышленности во многом зависит от успешного освоения технологий их соединения. При сварке этих сплавов встречаются серьезные затруднения, которые вызваны специфическими физико-химическими свойствами титана: большой химической активностью при высоких температурах, высоким сродством к кислороду и водороду, особенно в расплавленном состоянии, склонностью к росту зерен при нагреве, структурными превращениями выше температуры полиморфного превращения, фазовыми превращениями при сварочном термическом цикле, приводящими к образованию хрупких фаз.

Разработанные технологии изготовления листов из сплава VT18U обеспечивают высокие характеристики жаропрочности, превышающие аналогичные показатели жаропрочного отечественного листового титанового сплава VT20. Одним из важнейших

моментов в применении полуфабрикатов является правильный выбор методов и режимов сварки. Жаропрочные титановые сплавы могут с успехом заменить жаропрочные сплавы на никелевой основе в сварных конструкциях корпусов перспективных двигателей и снизить их массу на 20–25%. Выбор рационального режима сварки, а также термообработки и поверхностной обработки позволяет получить сварные соединения, равнопрочные основному материалу, и снизить остаточные напряжения [1–16].

Разработанная совместно с Институтом физики прочности и материаловедения СО РАН технология ультразвуковой ударной обработки (УУО) сварных соединений алюминиевых сплавов и сталей позволяет повысить усталостные характеристики сварных соединений [17–20]. Есть основания предполагать, что и для сварных соединений из титанового сплава будет получен положительный результат после проведения такой обработки.

### **Материалы и методы**

Применялась автоматическая аргоно-дуговая (ААрДЭС) и электронно-лучевая сварка (ЭЛС) для листов толщиной 1 и 3 мм и плит толщиной 14 мм, изготовленных на ОАО «Корпорация ВСМПО–АВИСМА» из опытных слитков массой 30–35 кг.

Аргоно-дуговую сварку проводили на автомате АДСВ-7 при постоянном токе прямой полярности. Изготавливались стыковые соединения без разделки кромок. Перед сваркой для удаления поверхностного слоя металла, насыщенного газами, заготовки и присадка проходили травление. Свариваемые кромки заготовок зачищали механической металлической щеткой. Качество сварных соединений оценивали визуально по геометрическим параметрам шва, а также по результатам рентгеновского контроля.

Электронно-дуговую сварку выполняли на установке ЭЛУ20МК с фиксированным ускоряющим напряжением 60 кВ, оснащенной системой ЧПУ Sinumerik 840Di и энергоблоком ЭЛА60Б-М, позволяющими в процессе сварки задавать координаты перемещения пушки, а также скорость сварки, ток сварки и ток фокусировки. В качестве катода использовали «таблетку» из гексаборида лантана с диаметром активной зоны 4 мм.

В работе выбрана технология ЭЛС горизонтальным электронным лучом без технологических подкладок, обеспечивающая меньшую вероятность образования пористости и интенсивности выгорания легирующих элементов в сварном соединении, а также рабочее расстояние ( $L=200$  мм), зависящее от конструкции электронной пушки.

Уровень остаточных напряжений на сварных стыковых заготовках листов и плит размером 200×250 мм определяли непосредственно после сварки и вакуумного отжига

по двум режимам: одноступенчатому – при 950°C и двухступенчатому – при температуре первой ступени 930°C, второй ступени 580°C. Рентгеновскую съемку проводили на анализаторе остаточных напряжений PSF-3М фирмы Rigaku в  $Co K_{\alpha}$ -излучении (в направлении, поперечном сварному шву).

Для исследования механических свойств вырезаны поперечные образцы из стыковых сварных соединений. Проведены механические испытания для определения предела прочности при комнатной температуре и при 500°C (ГОСТ 1497–84) на разрывной машине ИР5113, длительной (100 ч) прочности при 500°C на машине ZST2/3-ВИЭТ, угла изгиба и ударной вязкости по шву и зоне сплавления (ГОСТ 6996–66) на маятниковом копре КМ-1, малоциклового усталости при  $\sigma_{max}=392$  МПа и коэффициенте асимметрии  $R=0,1$  (ГОСТ 25.502–79) на установке MTS (25 т, пульсатор Amsler HFP 5100).

Металлографические исследования сварных соединений проводили с использованием оптического комплекса Leica Dm IRM, оснащенного программно-аппаратным комплексом обработки изображения Image Expert Pro 3х.

Анализ характера излома образцов после испытаний на ударную вязкость проводили на растровом сканирующем микроскопе JSM-6490LV.

Ультразвуковую ударную обработку выполняли вдоль шва – по переходной зоне сварного соединения, перекрывая шов и зону термического влияния на 4–5 мм. Для обработки использовали оборудование: генератор ИЛ4, предназначенный для генерации электрических импульсов с частотой 25 кГц и мощностью 650 Вт; магнитострикционный преобразователь с рабочим инструментом, преобразующим колебания электрического тока в механические колебания и осуществляющий с помощью инденторов обработку поверхности сварного шва и околошовной зоны.

Для снятия остаточных напряжений и выравнивания структурной неоднородности проводили вакуумный отжиг в электропечи ВЕГА-3 по одноступенчатому (950°C) и двухступенчатому (930+580°C) режимам.

Для исследования влияния присадочного материала и параметров режима ААрДЭС на качество формирования сварного соединения листов и выбора присадки проводился целый ряд экспериментов, включающий использование принудительного охлаждения путем наложения медных пластин в зоне термического влияния. При сварке с накладками обеспечивается возможность регулирования структуры металла шва и околошовной зоны.

## Результаты

При сварке листовых полуфабрикатов из псевдо- $\alpha$ -титановых сплавов, к которым относится исследуемый сплав, с использованием присадочного материала, отличного по составу от основного материала, происходит изменение химического состава металла шва, морфологии структуры, фазового состава и параметров дендритной ликвации. Для получения свойств сварного соединения на уровне основного металла целесообразно использовать присадочный материал, близкий по составу к основному [11, 12].

Автоматическую аргоно-дуговую сварку листов толщиной 1 и 3 мм проводили без присадки и с использованием присадочного материала из самого сплава в виде «лапши» и проволоки марки ВТ20-2св диаметром 2 мм. Присадочная проволока ВТ20-2св системы Ti–Al–Mo–V–Zr содержит меньшее количество  $\beta$ -стабилизирующих элементов, чем основной материал, что приводит к уменьшению вероятности образования в шве хрупкой  $\alpha_2$ -фазы.

Установлено, что изменение состава присадочного материала при ААрДЭС не влияет на характеристики сварных соединений, что может быть связано еще и с тем, что сварку проводили встык (без разделки кромок), а количество в шве присадочного материала не превышает 30%. Длительная прочность сварных соединений ( $\sigma_{100}^{500^\circ}$ ) также соответствует характеристикам основного материала.

Исследование уровня остаточных напряжений в стыковых сварных соединениях, выполненных с присадочным материалом, показало, что присутствуют растягивающие напряжения, максимальный уровень которых не превышает 53 МПа. Проведение последующего вакуумного отжига (независимо от режима) снижает уровень остаточных напряжений до нулевого значения.

Проведенные исследования влияния режимов термообработки на механические свойства сварных соединений (ААрДЭС и ЭЛС) показали, что сварные соединения практически равнопрочны основному материалу, имеют высокую ударную вязкость и удовлетворительную пластичность (см. таблицу).

Применение двухступенчатого отжига при температуре первой ступени 930°C, второй ступени 580°C обеспечивает незначительное повышение прочностных характеристик при комнатной и повышенной температурах, однако показатели пластичности и ударной вязкости снижаются на 20–60%, особенно для соединений, выполненных аргоно-дуговой сваркой, значения длительной прочности также снижаются.

Таким образом, по результатам сравнительной оценки механических свойств установлено, что для сварных соединений жаропрочного псевдо- $\alpha$ -титанового сплава BT18Y более целесообразно применение одноступенчатого вакуумного отжига при 950°C.

**Механические свойства сварных соединений листов и плит из жаропрочного псевдо- $\alpha$ -титанового сплава (средние значения)**

Сварка	Присадочный материал	Полуфабрикат	Температура вакуумной обработки (после сварки), °C	$\sigma_b$ , МПа, при температуре, °C		$\sigma_{100}^{500}$ , МПа	Угол изгиба $\alpha$ , град	КСУ, кДж/м <sup>2</sup>	МЦУ: N, кцикл
				20	500				
Основной металл BT18Y	–	Лист толщиной 2 мм	–	1080	730	590	45	470	60
ААрДЭС	Без присадки	Лист толщиной 1 мм	950	1050	735	617	42	370	–
	С присадкой BT20-2св	Лист толщиной 3 мм	950	1035	755	638	38	415	53
			930+580 950+УУО	1045 1025	775 745	589 –	13 52	295 490	– >300
С присадкой состава основного металла	Лист толщиной 3 мм	950	1040	755	617	45	395	–	
ЭЛС	–	Плита толщиной 14 мм	950	1025	720	638	54	440	–
			930+580	1060	740	589	38	350	–

Для определения влияния способа сварки и варианта термообработки на структуру сварного соединения проведены металлографические исследования сварных соединений. Анализ макроструктуры сварных соединений после ААрДЭС показал, что размеры шва и зоны термического влияния определяются термическим циклом сварки. При сварке ААрДЭС с принудительным охлаждением протяженность шва и зоны термического влияния заметно меньше (рис. 1, а), чем в случае сварки без охлаждения (см. рис. 1, б). Для сварных швов характерен значительный размер зерна, что является типичным для  $\alpha$ - и псевдо- $\alpha$ -сплавов.

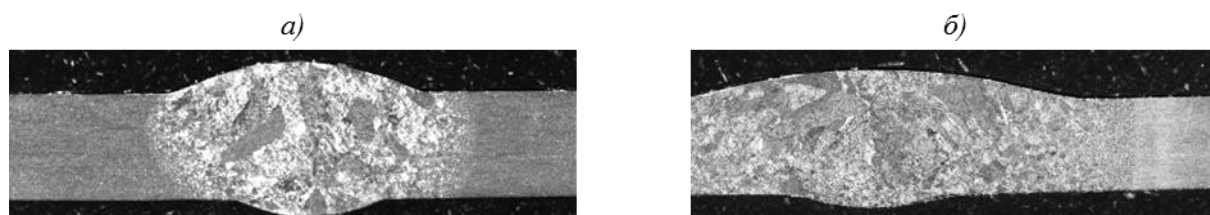


Рис. 1. Макроструктура ( $\times 7$ ) сварных соединений листов из сплава BT18Y толщиной 3мм, выполненных ААрДЭС с присадкой BT20-2св:

а – сварка с принудительным охлаждением; б – сварка без принудительного охлаждения

Во всех случаях, независимо от изменения скорости охлаждения, структура сварного шва состоит из крупных зерен матрицы с игольчатыми выделениями  $\alpha$ - и  $\alpha'$ -фазы (рис. 2). Характер формирования таких фаз в основном зависит от скорости охлаждения в интервале превращения  $\beta \rightarrow \alpha$ . При малых скоростях охлаждения образу-

ются широкие и длинные пластины, при высоких скоростях охлаждения формируется мелкоигльчатая  $\alpha$ -фаза. Кроме того, размер и форма игльчатой  $\alpha$ -фазы определяется химическим составом шва и толщиной свариваемых полуфабрикатов из сплава ВТ18У [4, 13, 14]. Так, применение присадочных материалов различного состава, а также сварка листов толщиной 1 и 3 мм влияет на параметры  $\alpha$ -фазы (см. рис. 2, а, в, г).

Строение околошовной зоны характерно для всех технологических вариантов сварки и представляет собой мелкозернистую область равноосных кристаллов с увеличением их размеров по мере приближения к литой зоне шва. Последующий вакуумный отжиг стабилизирует структуру сварного соединения.

Анализ структуры сварных соединений, выполненных ЭЛС, показал, что в результате высоких скоростей охлаждения происходит сращивание в центре шва крупных, вытянутых в направлении теплоотвода, кристаллитов и образуется резкий переход от литого металла шва к основному металлу (рис. 3). Структура сварного шва состоит из крупных зерен матрицы с игльчатыми выделениями  $\alpha$ - и  $\alpha'$ -фазы (см. рис. 3, б). Применение двухступенчатого отжига приводит к получению более мелкоигльчатой  $\alpha$ -фазы, что повышает прочность сварного соединения.

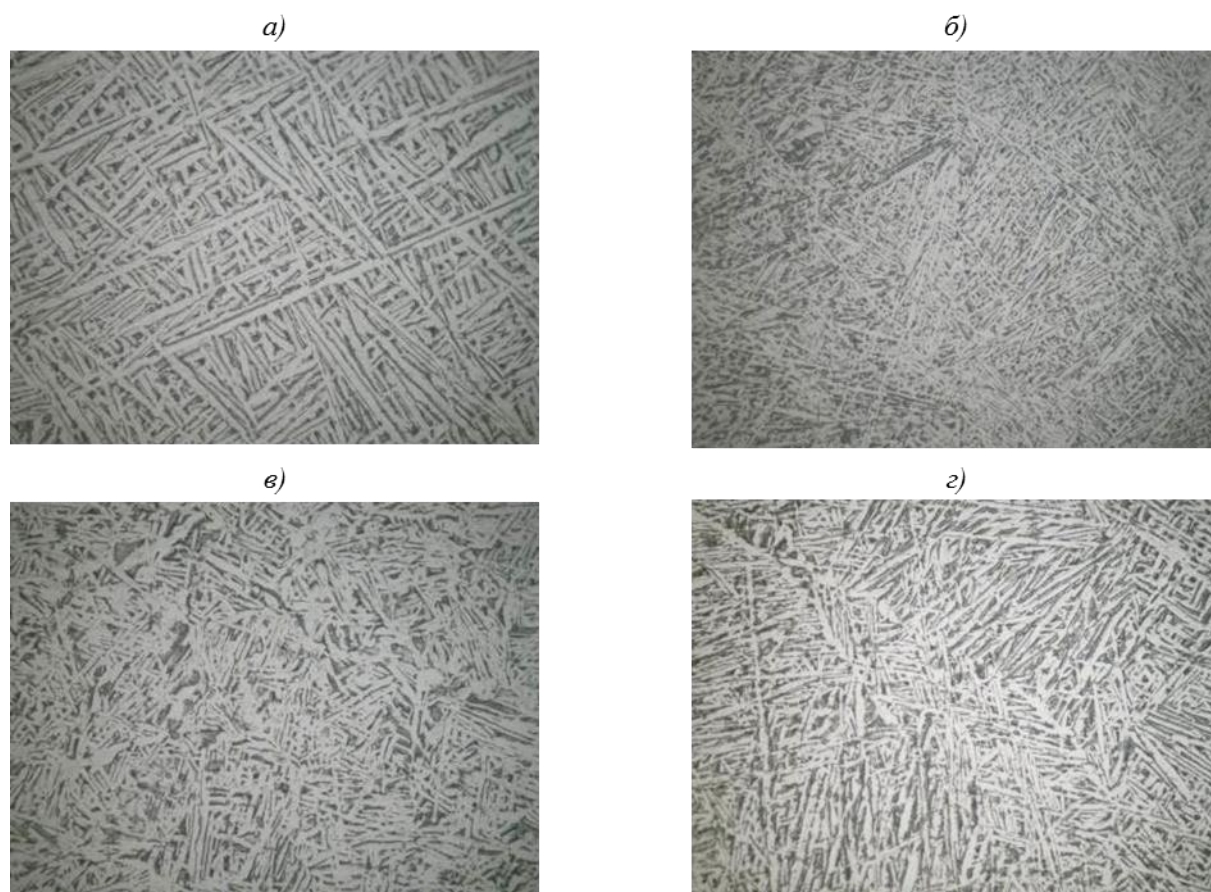


Рис. 2. Микроструктура ( $\times 500$ ) сварного шва листов из сплава ВТ18У:

а – лист толщиной 3 мм, ААрДЭС с присадкой ВТ20-2св, отжиг при 950°C; б – лист толщиной 3 мм, ААрДЭС с присадкой ВТ20-2св+двухступенчатый отжиг (930+580°C); в – лист толщиной 3 мм, ААрДЭС с присадкой состава основного металла, отжиг при 950°C; г – лист толщиной 1 мм, ААрДЭС без присадки

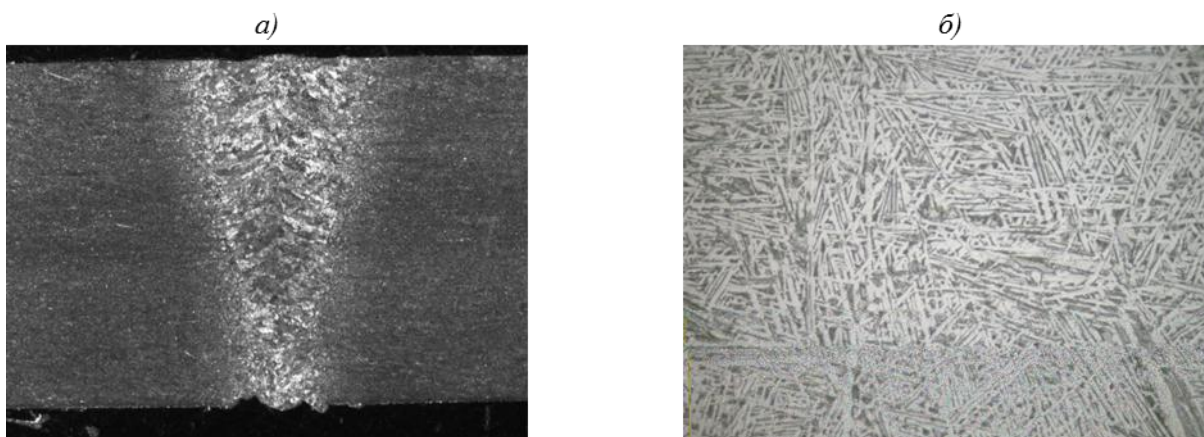


Рис. 3. Структура сварного соединения плит из сплава ВТ18У, выполненного ЭЛС, после отжига при 950°С

Исследованы изломы образцов после ТО: значения ударной вязкости составляют 449 и 322 кДж/м<sup>2</sup> для одноступенчатого и двухступенчатого отжига соответственно.

Установлено, что разрушение в обоих случаях происходит преимущественно с образованием ямочного рельефа. Для образца, прошедшего двухступенчатый отжиг, характерен переход разрушения от надреза, нанесенного по шву, на зону сплавления, при этом пластичность ямочного рельефа у такого образца ниже, чем у образца, прошедшего одноступенчатый отжиг (рис. 4).

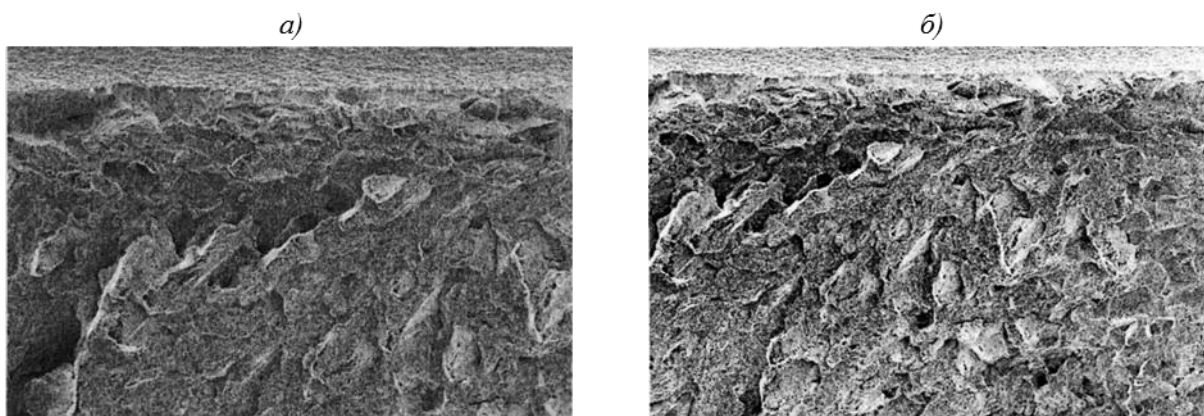


Рис. 4. Макроструктура (*a* –  $\times 25$ ; *b* –  $\times 20$ ) изломов сварных соединений плит из сплава ВТ18У, выполненных ЭЛС, после двухступенчатого (*a*) и одноступенчатого отжига (*b*)

Результаты металлографических и фрактографических исследований сварных соединений подтвердили данные механических испытаний и показали, что для вакуумного отжига сварных соединений целесообразно использовать одноступенчатый режим (950°С), обеспечивающий более высокие показатели пластичности и ударной вязкости по сравнению с двухступенчатым отжигом.

Исследовано влияние ультразвуковой ударной обработки (УУО) на усталостные (МЦУ) и прочностные ( $\sigma_b$ ,  $\sigma_{100}^{500^\circ}$ ) характеристики сварных соединений сплава ВТ18У. Выбран оптимальный режим УУО\*, обеспечивающий формирование наноструктурированного поверхностного слоя в обработанной переходной зоне сварного соединения (рис. 5, *a*), что приводит к повышению характеристик МЦУ с 53000 циклов (без УУО) до значений, составляющих более 300000 циклов (после обработки). Установлено, что УУО не приводит к снижению прочностных характеристик сварных соединений, которые находятся на уровне свойств основного материала как при 20°C, так и при 500°C (см. таблицу). Замеры остаточных напряжений показали, что наноструктурирование поверхностных слоев сварных соединений приводит к оптимальному напряженному состоянию с формированием в сварном шве и зоне термического влияния остаточных напряжений сжатия (вместо остаточных напряжений растяжения в необработанном материале).

Оценка пластичности по углу изгиба ( $\alpha$ ) показала, что образующийся в результате УУО наноструктурированный слой тормозит зарождение трещин при испытании на статический изгиб. Вместо хрупкого разрушения по зоне термического влияния происходит разрушение по сварному шву с большей пластичностью (см. рис. 5, *б*, *в*), при этом значения угла  $\alpha$  увеличиваются на ~60%.

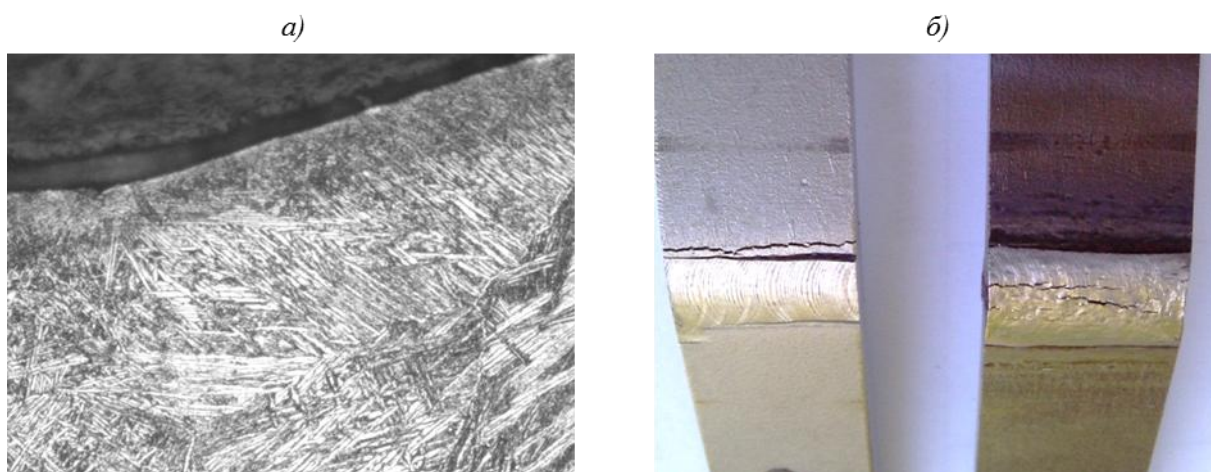


Рис. 5. Микроструктура ( $\times 100$ ) и внешний вид образцов сварных соединений (ААрДЭС) после испытаний на статический изгиб:

*a* – переходная зона сварного соединения после УУО; *б* – образец без УУО; *в* – образец, прошедший УУО

\*Работы по УУО сварных соединений проводились к.т.н. Ю.И. Почиваловым, ИФПим СО РАН.

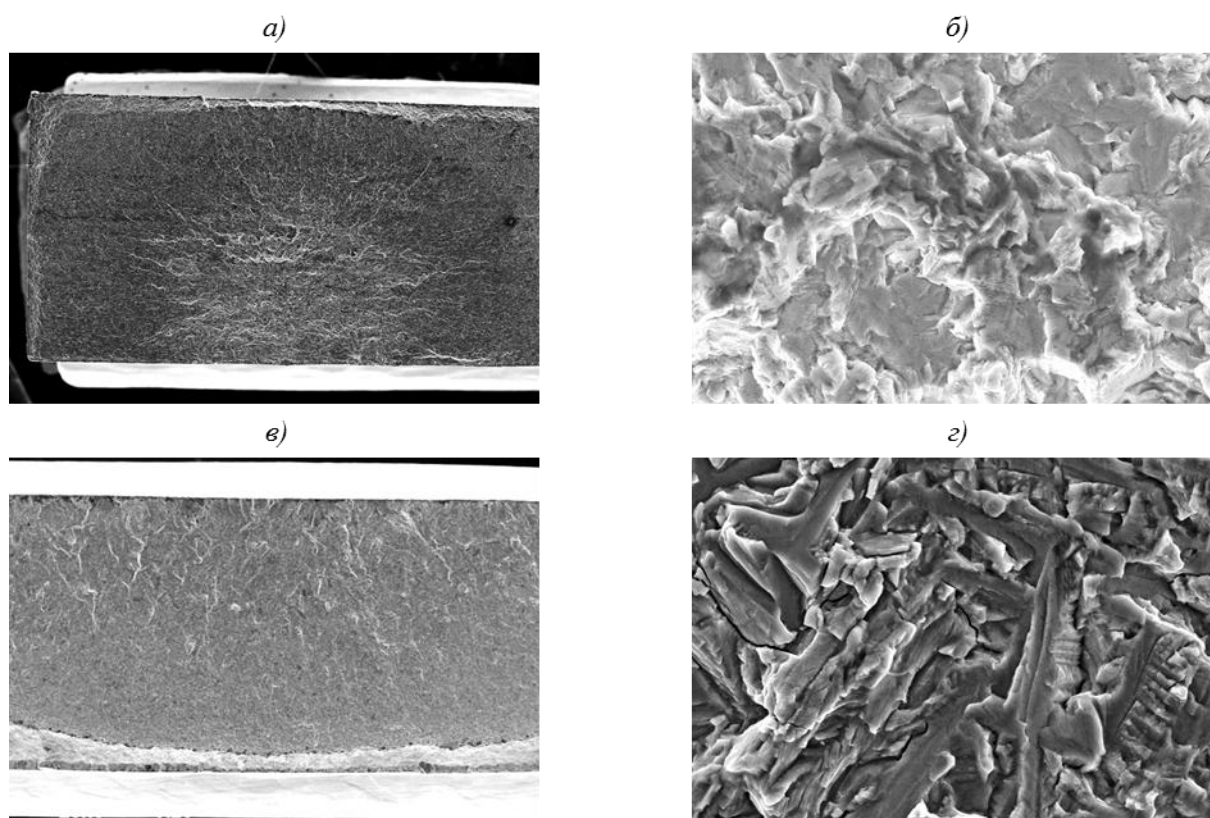


Рис. 6. Макро- (*а, в* –  $\times 20$ ) и микроструктура (*б* –  $\times 750$ ; *г* –  $\times 1500$ ) излома сварного соединения (ААрДЭС):

*а, б* – после УУО; *в, г* – без УУО

Фрактографический анализ сварных соединений листов показал, что разрушение сварного образца после УУО произошло по основному металлу на расстоянии 4–5 мм от шва после наработки более  $3 \cdot 10^5$  циклов. Протяженность зоны разрушения усталостного характера составляет  $\sim 16$  мм. Основной очаг разрушения расположен на расстоянии 3,1 мм от торца образца и 1,0 мм от поверхности листа и связан с металлургическим дефектом материала (рис. 6, *а, б*). Разрушение образца без УУО ( $N=6 \cdot 10^3$  циклов) произошло от поверхности листа (толщиной 3 мм) по зоне сплавления. Протяженность зоны разрушения преимущественно усталостного характера составляет 12 мм (см. рис. 6, *в, г*). Многочисленные очаги усталостного разрушения обнаружены по всей ширине образца, как с одной поверхности, так и с другой (рис. 6, *в*). Разрушение от основного очага происходит в основном с образованием циклических квазисколов по пластинам  $\alpha$ -фазы (см. рис. 6, *г*).

Таким образом, установлено, что УУО обеспечивает снятие остаточных напряжений, а также повышение характеристик МЦУ сварных соединений листов более чем в 6 раз по сравнению с вариантом без обработки.

## Обсуждение и заключения

Сварные соединения, выполненные автоматической аргоно-дуговой сваркой с принудительным охлаждением и электронно-лучевой сваркой, практически равнопрочны основному материалу, имеют высокую ударную вязкость и удовлетворительную пластичность.

Для улучшения механических свойств и снятия остаточных напряжений, вакуумный отжиг сварных соединений целесообразно проводить при температуре 950°С.

Ультразвуковая ударная обработка сварных соединений обеспечивает снятие растягивающих напряжений, а также повышение характеристик малоциклового усталости более чем в 6 раз.

## Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории титановых сплавов во главе с Н.А. Ночовой за помощь в анализе структурных состояний сварных соединений, выполненных различными видами сварки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России //Металлы Евразии. 2012. №3. С. 10–15.
2. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
3. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
4. Хорев А.И. Фундаментальные и прикладные работы по конструкционным титановым сплавам и перспективные направления их развития //Труды ВИАМ. 2013. №2. Ст. 04 ([viam-works.ru](http://viam-works.ru)).
5. Хорев А.И., Белов С.П., Глазунов С.Г. Металловедение титана и его сплавов. М.: Металлургия. 1992. 352 с.
6. 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](http://viam-works.ru)).
7. Хорев А.И. Разработка конструкционных титановых сплавов для изготовления деталей узлов авиакосмической техники //Сварочное производство. 2009. №3. С. 13– 23.
8. Хорев А.И. Научные основы достижения высокой и сверхвысокой конструкционной прочности свариваемых титановых сплавов //Сварочное производство. 2011. №9. С. 14– 26.
9. Иноземцев А.А., Башкатов И.Г., Коряковцев А.С. Титановые сплавы в изделиях разработки

- ОАО «Авиадвигатель» /В кн. Современные титановые сплавы и проблемы их развития: Сб. статей. М.: ВИАМ. 2010. С. 43–46.
10. Ночовная Н.А., Иванов В.И., Алексеев Е.Б., Кочетков А.С. Пути оптимизации эксплуатационных свойств сплавов на основе интерметаллидов титана //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 196–206.
  11. Горбовец М.А., Беляев М.С., Ходинев И.А. Влияние эксплуатационной температуры на скорость роста трещины усталости в интерметаллидном титановом сплаве //Авиационные материалы и технологии. 2013. №3. С. 13–15.
  12. Хорев А.И. Повышение конструкционной прочности термически и термомеханически упрочняемых титановых сплавов //Вестник машиностроения. 2010. №5. С. 26– 34.
  13. Хорев А.И. Создание теории термической обработки и текстурного упрочнения перспективных титановых сплавов //Материаловедение. 2009. №4. С. 28– 36.
  14. Яковлев А.Л., Ночовная Н.А. Влияние термической обработки на свойства листов из высокопрочного титанового сплава ВТ23М //Авиационные материалы и технологии. 2013. №4. С. 8–13.
  15. 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.
  16. Лукин В.И., Лоскутов В.М., Редчиц В.В. Присадочные материалы для сварки конструкционных титановых сплавов //Сварочное производство. 2002. №5. С. 37–42.
  17. 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).
  18. Панин В.Е., Каблов Е.Н., Плешанов В.С. и др. Влияние ультразвуковой ударной обработки на структуру и сопротивление усталости сварных соединений высокопрочной стали ВКС-12 //Физическая мезомеханика. 2006. Т.9. №2. С. 85–96.
  19. Балашов Б.Ф., Петухов А.Н., Володенко Б.В. Исследование усталостной прочности некоторых титановых сплавов //Технология легких сплавов. 1974. №10. С. 39–43.
  20. Балашов Б.Ф., Петухов А.Н., Цейтлин В.И., Архипов А.Н. Влияние поверхностного упрочнения на усталостную прочность титанового сплава ВТ9 при различных температурах /Новые технологические процессы и надежность ГТД: Технический бюллетень. М.: ЦИАМ. 1976. №3(7). С. 3–10.

#### REFERENCES LIST

1. Kablov E.N. Sovremennye materialy – osnova innovacionnoj modernizacii Rossii [Modern materials – basis of innovative modernization of Russia] //Metally Evrazii. 2012. №3. S. 10–15.

2. Kablov E.N. Strategicheskie napravlenija razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda [The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 7–17.
3. Kablov E.N. Aviakosmicheskoe materialovedenie [Aerospace materials science] //Vse materialy. Jenciklopedicheskij spravocnik. 2008. №3. S. 2–14.
4. Horev A.I. Fundamental'nye i prikladnye raboty po konstrukcionnym titanovym splavam i perspektivnye napravlenija ih razvitija [Fundamental and applied works on structural titanium alloys and perspective directions of their development] //Trudy VIAM. 2013. №2. St. 04 (viam-works.ru).
5. Horev A.I., Belov S.P., Glazunov S.G. Metallovedenie titana i ego splavov [Metallurgical science of titanium and its alloys]. M.: Metallurgija. 1992. 352 s.
6. Kashapov O.S., Novak A.V., Nochovnaja N.A., Pavlova T.V. Sostojanie, problemy i perspektivy sozdaniya zharoprochnyh titanovyh splavov dlja detalej GTD [Condition, problems and perspectives of creation of heat resisting titanium alloys for GTD details] //Trudy VIAM. 2013. №3. St. 02 (viam-works.ru).
7. Horev A.I. Razrabotka konstrukcionnyh titanovyh splavov dlja izgotovlenija detalej uzlov aviakosmicheskij tehniki [Development of structural titanium alloys for manufacturing of details of nodes of aerospace equipment] //Svarocnoe proizvodstvo. 2009. №3. S. 13– 23.
8. Horev A.I. Nauchnye osnovy dostizhenija vysokoj i sverhvisokoj konstrukcionnoj prochnosti svaraemyh titanovyh splavov [Scientific bases of achievement of high and ultrahigh constructional strength of welded titanium alloys] //Svarocnoe proizvodstvo. 2011. №9. S. 14– 26.
9. Inozemcev A.A., Bashkatov I.G., Korjakovcev A.S. Titanovye splavy v izdelijah razrabotki OAO «Aviadvigatel'» [Titanium alloys in products of development of JSC «Aviadvigatel'»] /V kn. Sovremennye titanovye splavy i problemy ih razvitija: Sb. statej. M.: VIAM. 2010. S. 43–46.
10. Nochovnaja N.A., Ivanov V.I., Alekseev E.B., Kochetkov A.S. Puti optimizacii jekspluacionnyh svojstv splavov na osnove intermetallidov titana [Ways of optimization of operational properties of alloys on the basis of titanium intermetallic compound] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 196–206.
11. Gorbovec M.A., Beljaev M.S., Hodinev I.A. Vlijanie jekspluacionnoj temperatury na skorost' rosta treshhiny ustalosti v intermetallidnom titanovom splave [Influence of operational temperature on the growth rate of crack of fatigue in intermetallidny titanium alloy] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №3. S. 13–15.
12. Horev A.I. Povyshenie konstrukcionnoj prochnosti termicheski i termomehanicheski uprochnjaemyh titanovyh splavov [Increase of constructional durability thermally and thermomechanical strengthened titanium alloys] //Vestnik mashinostroenija. 2010. №5. S. 26– 34.
13. Horev A.I. Sozdanie teorii termicheskoj obrabotki i teksturnogo uprochnenija perspektivnyh titanovyh splavov [Creation of the theory of thermal processing and textural hardening of perspective titanium alloys] //Materialovedenie. 2009. №4. S. 28– 36.

14. Jakovlev A.L., Nochovnaja N.A. Vlijanie termicheskoj obrabotki na svojstva listov iz vysokoprochnogo titanovogo splava VT23M [Influence of thermal processing on properties of sheets from high-strength BT23M titanium alloy] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №4. S. 8–13.
15. Kashapov O.S., Pavlova T.V., Nochovnaja N.A. Vlijanie rezhimov termicheskoj obrabotki na strukturu i svojstva zharoprochnogo titanovogo splava dlja lopatok KVD [Influence of modes of thermal processing on structure and property of heat resisting titanium alloy for KVD blades] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2010. №2. S. 8–14.
16. Lukin V.I., Loskutov V.M., Redchic V.V. Prisochnye materialy dlja svarki konstrukcionnyh titanovyh splavov [Prisochnye materials for welding of structural titanium alloys] //Svarochnoe proizvodstvo. 2002. №5. S. 37–42.
17. Nochovnaja N.A., Panin P.V. Analiz ostatochnyh makronaprjazhenij v svarnyh soedinenijah titanovyh splavov raznyh klassov [The analysis of residual macrostress in welded compounds of titanium alloys of different classes] //Trudy VIAM. 2014. №5. St. 02 (viam-works.ru).
18. Panin V.E., Kablov E.N., Pleshanov V.S. i dr. Vlijanie ul'trazvukovoj udarnoj obrabotki na strukturu i soprotivlenie ustalosti svarnyh soedinenij vysokoprochnoj stali VKS-12 [Influence of ultrasonic shock processing on structure and resistance of fatigue of welded compounds of VKS-12 high-strength steel] //Fizicheskaja mezhmehanika. 2006. T.9. №2. S. 85–96.
19. Balashov B.F., Petuhov A.N., Volodenko B.V. Issledovanie ustalostnoj prochnosti nekotoryh titanovyh splavov [Research of fatigue resistance of some titanium alloys] //Tehnologija legkih splavov. 1974. №10. S. 39–43.
20. Balashov B.F., Petuhov A.N., Cejtlin V.I., Arhipov A.N. Vlijanie poverhnostnogo uprochnenija na ustalostnuju prochnost' titanovogo splava VT9 pri razlichnyh temperaturah [Influence of surface strengthening on fatigue resistance of BT9 titanium alloy at different temperatures] /Novye tehnologicheskie processy i nadezhnost' GTD: Tehnicheskij bjulleten'. M.: CIAM. 1976. №3(7). S. 3–10.