

Муравьев В.И., Клешина О.Н., Кузнецов А.А., Матвеев Д.В.
V.I.Muravyev, O.N.Kleshnina, A.A.Kuznetsov, D.V.Matveenko

05.16.01

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ УВЕЛИЧЕНИЯ ПРОЧНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ТИТАНОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ УПРАВЛЕНИЕМ ТЕРМИЧЕСКИМ ЦИКЛОМ СВАРКИ ON POSSIBILITY TO IMPROVE THE STRENGTH AND DURABILITY OF TITANIUM- MADE STRUCTURES BY CONTROLLING THE THERMAL CYCLE OF WELDING

Муравьев Василий Илларионович — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ГОУВПО «КНАГТУ». E-mail: ktsp@knastu.ru.

Vassily I. Muravyev — Doctor in Engineering, Professor, Chief Researcher for Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ktsp@knastu.ru.

Клешина Оксана Николаевна — аспирант ГОУВПО «КНАГТУ». E-mail: ktsp@knastu.ru.
Oksana N. Kleshnina — PhD Candidate, Chief Researcher for Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ktsp@knastu.ru.

Кузнецов Александр Анатольевич — аспирант ГОУВПО «КНАГТУ». E-mail: ktsp@knastu.ru.
Alexander A. Kuznetsov — PhD Candidate, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ktsp@knastu.ru.

Матвеев Дмитрий Викторович — кандидат технических наук, начальник БТК цеха ОАО «КНААПО». E-mail: ktsp@knastu.ru.
Dmitry V. Matveenko — PhD in Engineering, Head of Quality Control for JSC «KnaAPO» E-mail: ktsp@knastu.ru.

Аннотация: Исследовано влияние термического цикла сварки (ТЦС) на структуру и свойства сварных соединений из титанового сплава BT20. Показано, что удаление капиллярно-конденсированной влаги с поверхности сварных заготовок и дегазация сварочной ванны параметрами ТЦС приводят к исключению пористости и существенному снижению механических свойств сварных соединений. Использование методов раскроя заготовок, исключающих капиллярную конденсацию влаги (например, ГЛР, полировка и т. д.) на свариваемых кромках, позволяет варьировать режимами ТЦС и получать свойства сварного соединения на уровне свойств основного металла.

Summary: The paper deals with the issue of impact by the thermal cycle of welding (TCW) upon the structure and properties of welded Titanium alloy BT20 joints. It is demonstrated that removal of capillary condensed moisture from welding blank surfaces and degasifying of weld puddle by WTC parameters causes the elimination of porosity and leads to a significant deterioration of welding joints' mechanical properties. Employment of blank shaping methods that exclude capillary moisture condensation on welded edges (for instance, gas-laser shaping, polishing, etc.) allows to vary WTC conditions and obtain welding joint properties equivalent to parent metal properties.

Ключевые слова: титановые конструкции, порообразование, термический цикл сварки, капиллярно-конденсированная влага, прочностные свойства, структура.

Keywords: titanium structures, pore formation, welding thermal cycle, capillary condensed moisture, strength properties, structure.

Общеизвестно, что при сварке плавлением титановых сплавов могут появляться поры. Отрицательное воздействие пор максимально при работе конструкций в условиях циклического нагружения. Снижение усталостных характеристик связано не только с действием пор как геометрических концентраторов напряжения, но в основном с уменьшением запаса пластичности металла вблизи границ пор из-за увеличения в нём в несколько раз концентрации водорода.

На практике при изготовлении сварных конструкций в технических требованиях закладывается снижение предела прочности сварного шва на 10% от предела прочности основного материала. При производстве данное снижение оказывается еще больше — 11-15%. При исправлении дефектов, полученных при сварке (поры, подрезы, вольфрамовые включения и др.) подваркой, происходит дальнейшее снижение предела прочности металла сварного шва.

Из всего многообразия исследований причин пороо-

Таблица 1

Эффективность современных методов улучшения плотности и свойств металла шва конструкций из титановых сплавов

Операция	Методы	Число пор, приходящихся на 100 мм сварного шва	Предел прочности, МПа	Угол загиба, град	Факторы, определяющие свойства	Виды дефектов и методы их устранения	Возможные направления улучшения свойств
Раскрой и последующая обработка заготовок и присадочной проволоки	Резка на ножницах гильотинного типа	31-71	710-960	27-62	— Количество адсорбированной и капиллярно-конденсированной влаги, загрязнения на поверхности заготовок. — Время пребывания в расплавленном состоянии. — Скорость β — α -превращения. — Время пребывания в β -фазе. Это приводит к изменению: — величины зерна; — формы и величины внутризеренной структуры.	1. Поры. Удаление пор выборкой, подварка и термообработка. 2. Понижение свойств металла шва и зоны термического влияния (ЗТВ) на 10%. Увеличение запаса прочности при создании конструкции.	1. Разработка и исследование эффективных методов контроля качества подготовки поверхности заготовок и присадочной проволоки. 2. Разработка и исследование ТЦС, обеспечивающих: — эффективную дегазацию расплавленного металла и повышение его плотности; — формирование тонкопластинчатой внутризеренной структуры металла шва и ЗТВ, повышение механических свойств.
	Фрезерование	6-12	960-1080	48-64			
	Шабрение	5-22	980-1090	39-53			
	Полирование	1-3	980-1090	42-67			
	Газолазерный раскрой	0	1100-1150	38-43			
Термический цикл сварки	Рифление	50-57	950-1060	44-61			
	Переplав металла шва	18-107	880-1020	52-64			
	Сварка W-образным вольфрамовым электродом	0-13	910-1100	30-34			
	Сварка под флюсом	0-60	750-1050	56-68			

Таблица 2

Традиционные режимы автоматической сварки неплавящимся электродом непрерывной дугой стыковых соединений без разделки кромок

Толщина материала, мм	Сварочный ток, А	Диаметр вольфрамового электрода, мм	Диаметр присадочной проволоки ВТ1-00, мм	Скорость сварки, см/с	Установочная длина дуги, мм	Напряжение дуги, В	Расход аргона, л/мин	
							для защиты сварочной ванны	для защиты обратной стороны шва
1,2	80-100	3	1,6	0,556-0,694	1-1,5	8-9	5-7	2-4
2,0	115-140	3	1,6	0,417-0,556	1-1,5	9-10	7-9	3-5
2,5	160-190	3	1,6	0,339-0,222	1-1,5	8-9	9	7
3,0	225-260	3	1,6	0,208-0,233	1,0-1,5	9-10	8-10	3-5

бразования при сварке плавлением титановых сплавов наиболее достоверной является концепция о решающей роли в образовании пор при сварке газообразующих веществ, адсорбированных на кромках деталей, высказанная в 1969 г. В.В. Редчицем совместно с Г.Д. Никифоровым, которая признана многими исследователями и постоянно подтверждается.

Как показывает аналитическая оценка результатов исследований [1-4] (см. табл. 1), проблемы исключения пористости и доведения свойств металла шва до свойств основного металла не решены.

Увеличение времени существования сварочной ванны за счет ТЦС и применение флюсов приводят к исключению пористости, но при этом ухудшаются свойства металла шва и наоборот. Наиболее приемлемое направление исследований указано в табл. 1.

Методика проведения исследований:

Исследование проводили на листовых заготовках из сплава ВТ20 толщинами от 1,2 до 6 мм различных плавок каждого типоразмера. Использовались традиционные режимы автоматической аргонодуговой свар-

ки неплавящимся электродом стыковых соединений без разделки кромок заготовок (см. табл. 2).

Аналитическая оценка результатов входного и технологического контроля сварных заготовок проводилась за пятилетний период, кроме того оценивались свойства сварных заготовок по специально разработанным режимам сварки.

По техническим условиям (ТУ) поставка листов из сплава ВТ20 осуществляется после отжига при температуре 700-800 °С. Механические свойства в пределах: $\delta \geq 12\%$; $\varphi \geq 30^\circ$. Химический состав по ОСТ 190013-81 (%): Al = 5,5-7,0; Mo = 0,5-2,0; V = 0,8-2,5; Zr = 1,5-2,5. Примеси (не более) (%): C < 0,1; Fe < 0,25; Si < 0,15; O₂ < 0,15; N₂ < 0,05; H₂ < 0,015. Для сварных соединений допускается снижение прочности на 10% от требуемых по ТУ для основного металла.

Исследование макро- и микроструктуры и их фрактурологию проводили на растровом электронном микроскопе JSM-5600 фирмы «JEOL» (Япония) с волновым микрозондом.

Испытания механических свойств на растяжение

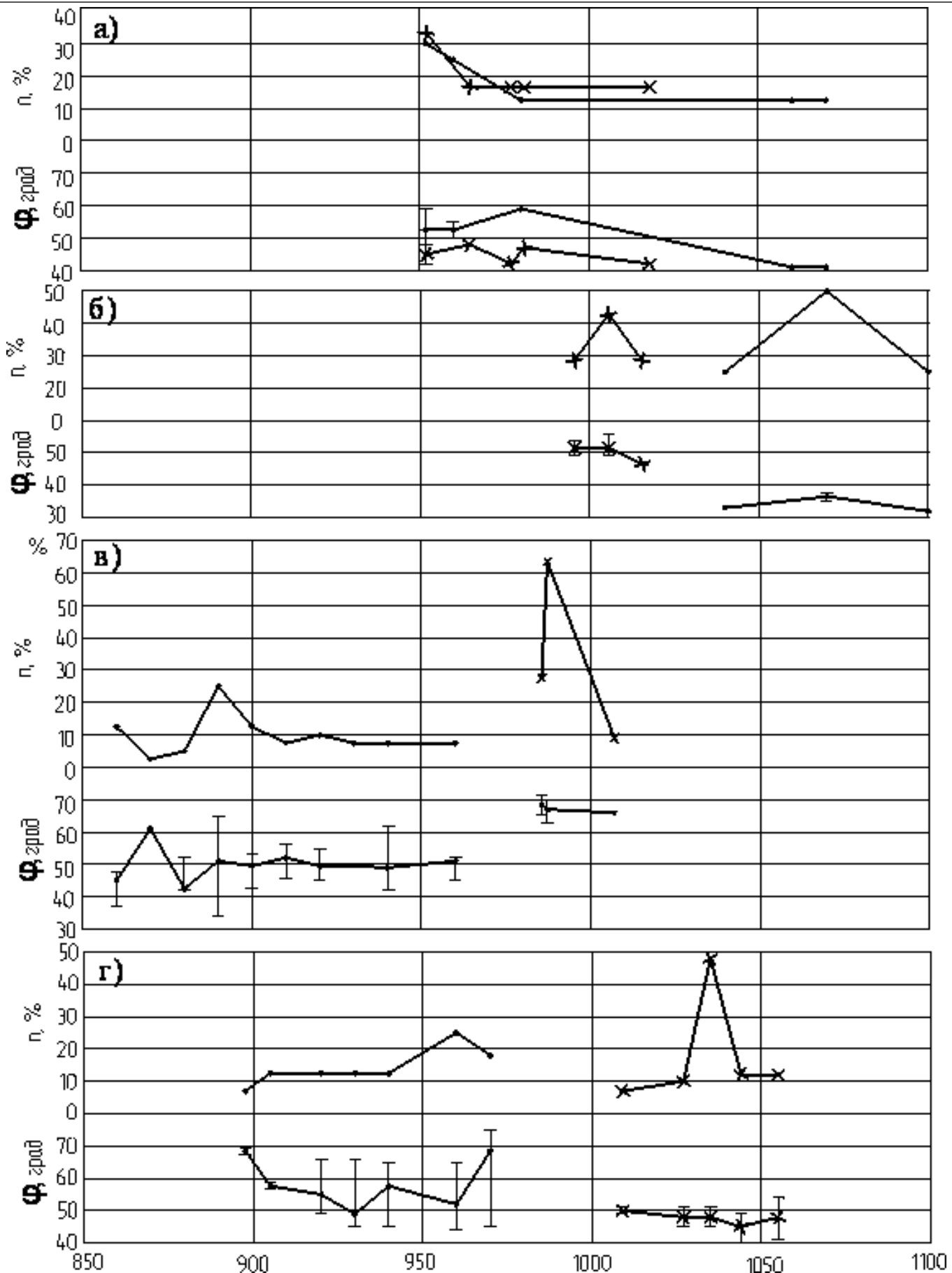


Рис. 1. Изменение механических свойств (σ_b , φ) основного металла (-x-x-x) и сварного шва (-•••-) образцов из сплава ВТ20, количества пор (п) на 100мм в зависимости от толщины листа δ , мм: а — 1,2; б — 2; в — 2,5; г — 3.

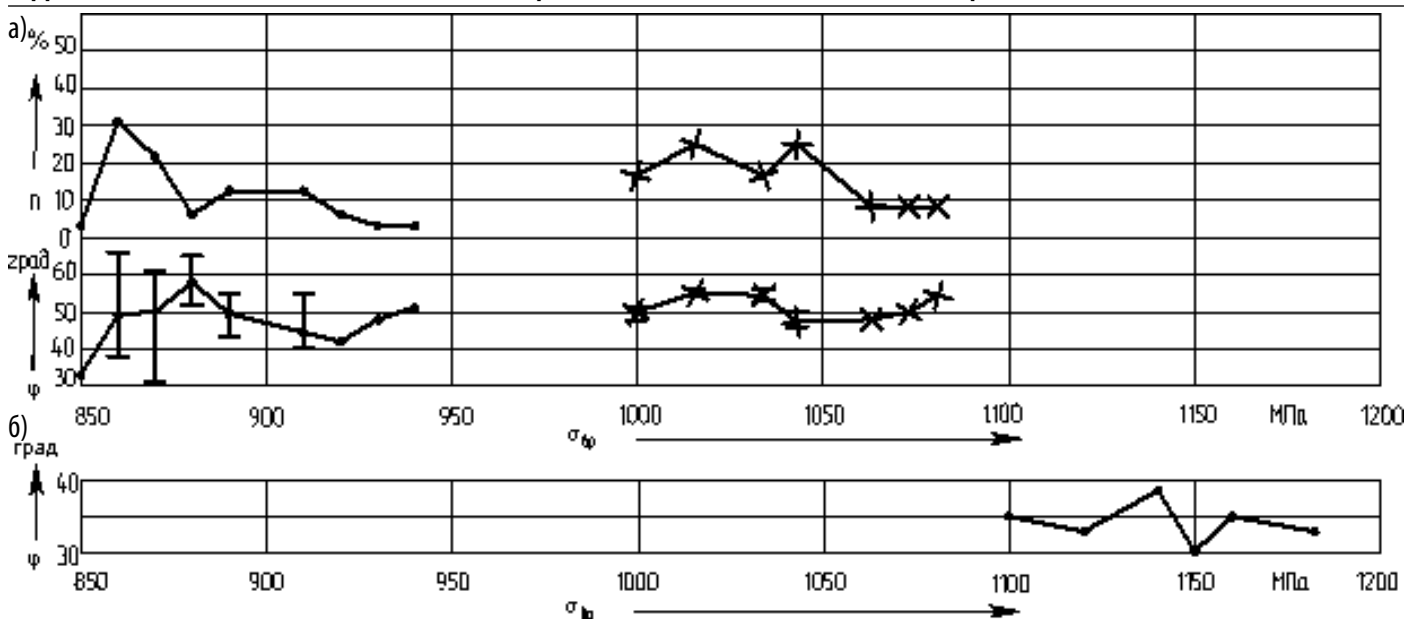


Рис. 2. Изменение механических свойств основного металла (-x-x-x) и сварного шва (-•-•-) образцов из листа $\delta = 2,5$ мм сплава VT20 в зависимости от режима ТЦС: а — традиционный режим сварки; б — «жесткий» режим сварки

проводили на универсальной испытательной машине ZD 10/10 «FRITZ» при комнатной температуре в соответствии с ГОСТ 1497-84 (ИСО 6892-84), испытания твердости по ГОСТ 9012-59 (ИСО 6506-81, ИСО 410-82), испытания механических сварных соединений по ГОСТ 6996-66. Химический состав поверхности титановых заготовок определяли на мобильном оптико-эмиссионном анализаторе «ARK-met» фирмы «PPM-System». Содержание кислорода и азота анализировали методом импульсного нагрева испытуемого образца в токе инертного газа на приборе «ONH-2000» фирмы ELTRA. Содержание водорода определяли спектральным мето-

дом с применением низковольтного импульсного разряда (метод трех эталонов) на спектрографе ИСП-51 в соответствии с ОСТ 90034-81.

Для сравнительного анализа были построены зависимости (рисунок 1, 2) механических свойств (угол загиба от временного сопротивления разрыву) основного металла со свойствами сварных соединений от толщины, химического состава, режима сварки.

Результаты исследований и их обсуждение

Как видно из данных рисунка 1, для толщины 1,2 мм предел прочности сварного соединения не только укладывается в рамки разброса предела прочности основного металла $\sigma_{\text{в}} = 960-1020$ МПа, но и для 24% сварных соединений его величина увеличилась на 7-8% по сравнению с прочностью основного металла. Для толщины листа 2,0 мм механические свойства сварного соединения у 100% выше по сравнению со свойствами основного металла более чем на 7-11%.

Существенное различие изменения механических свойств сварных соединений по сравнению со свой-

Таблица 3

Сравнительная оценка времени всплытия газовых пузырьков в зависимости от ТЦС

Температура расплава для заготовок, °С	Длина сварочной ванны, мм	Время пребывания металла в сварочной ванне в жидком состоянии, с	Время всплытия газовых пузырьков, с
1668	6,61	0,465	0,38
1768	6,23	0,56	0,45
1868	5,9	0,84	0,78
1968	5,59	1,18	1,10
2068	5,32	1,34	1,26
2168	5,07	1,5	1,38
2268	4,85	1,71	1,59

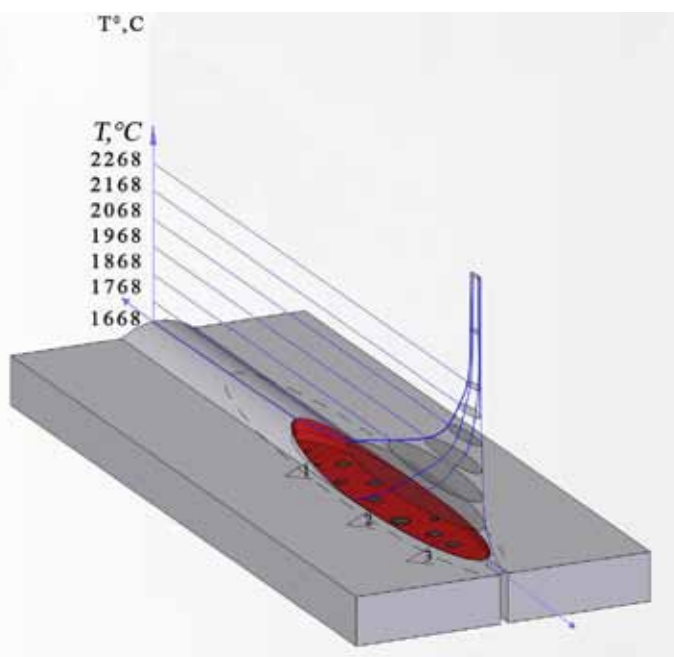
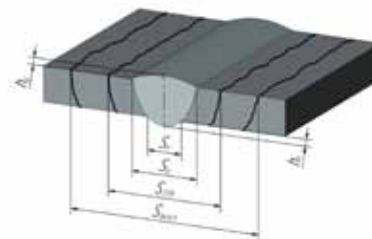


Рис. 3. Влияние ТЦС на распределение температурного поля по объему расплавленной ванны и ЗТВ

Таблица 4

Изменение геометрических параметров сварного шва сплава BT20 в зависимости от режима ТЦС (сварка ААрДЭС заготовок 500J100J2,5 мм)

Режимы сварки ААрДЭС							Геометрические размеры сварного шва, мм				
Вид сварки	№	I _{св.} , А	V, м/ч	U, В	Расход аргона, л/мин	* Время существования жидкой ванны τ _{ср} , с	Геометрические размеры сварного шва, мм				
							h _y	S _y	S _{общ}	h _n	S _n
Непрерывная	1	90	15	10	7,3-7,5	$\frac{0,98-2,97}{2,08}$	0,35	8	16	0,08	4
	2	90	20	10	4,5-7,5	$\frac{0,21-1,99}{1,31}$	0,05	7	22	0,1	22
	3	100	25	10	4,5-9	$\frac{0,46-1,71}{1,18}$	0,45	14	24	0,15	18
Импульсная	4	90	15	10	4,5-9	$\frac{0,98-2,97}{2,08}$	0,25	10	18	0,3	5
	5	150	15	10	4,5-9	$\frac{2,73-8,18}{5,72}$	0,4	12	20	0,25	16
	6	165	15	10	4,5-9	$\frac{3,3-9,99}{6,96}$	0,25	12	20	0,35	16



*- расчеты производились в диапазоне температур от 1668 до 2270 °C

ствами основного металла наблюдается у заготовок толщиной 2,5 мм и 3 мм. Для 100% сварных соединений значения предела прочности ($\sigma_b=860-960$ МПа) значительно ниже предела прочности основного ($\sigma_b=980-1100$ МПа). Кроме того, для толщины 2,5 мм около 44% сварных соединений, а для толщины 3 мм — 7% (рис. 1, в) имеют снижение предела прочности ниже допустимого для ответственных конструкций.

Как видно из данных рис. 2, существенное влияние на изменение механических свойств сварных соединений оказывает режим сварки. Так, при традиционных режимах предел прочности сварного соединения не укладывается в рамки разброса предела прочности основного металла $\sigma_b = 1070-1115$ МПа. Сварка на фор-

сированных режимах, т.е. с максимально возможной скоростью приводит к резкому увеличению временного сопротивления разрыву для сварного соединения, превышение составляет более 15%, при этом происходит снижение угла загиба с 50 до 30%.

Известно [5] улучшение свойств титановых сплавов после быстрого охлаждения из β -области и последующего отпуска, особенно литого металла. Этот факт положительного влияния на структуру и свойства титановых сплавов объясняется получением при выплавке мелкозернистой структуры слитка и изменением толщины и ориентировки α -пластин в процессе охлаждения. Из проведенных исследований следует, что механические свойства сварных соединений из псевдо- α -

Таблица 5

Изменение скорости охлаждения в интервалах T_{пн} в зависимости от ТЦС сплава BT20

Толщина свариваемого металла, мм	Сварочный ток, А	Напряжение дуги, В	Скорость сварки, мм/с	Длина сварочной ванны, мм	Время пребывания металла в сварочной ванне в жидком состоянии, с	Скорость охлаждения, °C/с, при температуре 960 °C
1,2	80	8	5,56	7,3	1,9	738,0
			2,78		3,9	396,0
	100	9	6,94	10,2	2,3	654,5
			4,17		3,5	393,0
1,5	90	9	5,56	9,2	2,4	582,5
			2,78		5,0	291,0
1,5	110	10	6,94	12,5	2,6	535,5
			4,17		4,5	321,5
2,0	115	9	4,17	11,7	4,2	341,5
	140	10	5,56	15,9	4,3	337,0
2,5	260	9	2,08	26,6	19,0	75,0
	240	8	2,33	21,5	14,0	102,5
3,0	260	9	2,08	26,6	19,0	75,0

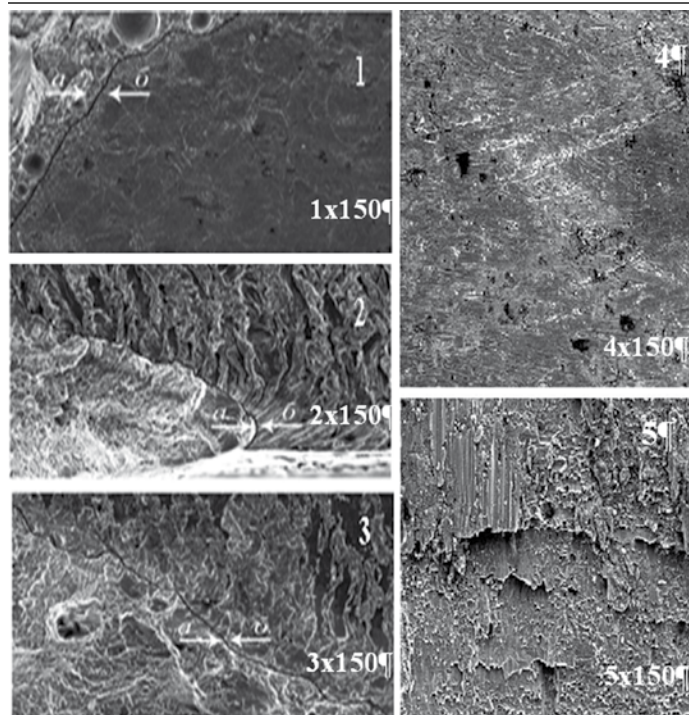


Рис. 4. Фрактограмма изломов образцов по зонам формирования соединения:

Зоны (а → ← б) сплавления с диффузионной сваркой: 1 — фрезерованные кромки перед сваркой — на всем протяжении зоны сплавления поры; 2 — кромки после ГЛР перед сваркой — пор нет; 3 — кромки одна после ГЛР + другая после раскроя на ножницах гильотинного типа — пор нет; зоны (б) диффузионной сварки: 1 — по всей поверхности замкнутые пустоты, 2 — регулярное чередование каналов и диффузионной сварки их кромок — замкнутых пустот нет; 3 — регулярное чередование вмятин и ответной заготовки после ГЛР — пустот нет; исходная поверхность заготовок перед сваркой: 4 — фрезерованных, 5 — после раскроя на ножницах гильотинного типа

титановых сплавов зависят преимущественно от процессов превращения в титановых сплавах при охлаждении из расплавленного состояния.

Расчеты распределения температурного поля (см. рис. 3) по объему расплавленной ванны и ЗТВ показывают, что перед фронтом расплавленной ванны располагается узкая, в несколько микрон, полоска металла с температурой, близкой к температуре плавления.

В изломе (см. рис. 4) этой зоны четко обнаруживается диффузионное соединение с наличием замкнутых пустот, которые при расплавлении металла приводят к образованию пор из-за испарения влаги и увеличения давления в заготовках с наличием капиллярно-конденсированной влаги в поверхностном слое стыкуемых кромок. Перед зоной диффузионного соединения наблюдается зона контактирования или автономной очистки от поверхностно-конденсированной влаги. Время и температура теплового поля в этой зоне не позволяют очистить её от капиллярно-конденсированной

Таблица 6

Изменение механических свойств сплава ВТ20 в зависимости от состояния рабочей поверхности, ТЦС, режимов отжига и упрочнения

№	Состояние образцов	σ_b , МПа	Угол загиба, град	Число циклов (N) до разрушения
1	ГЛР в среде азота (N)	1040	52	11470
2	ГЛР в среде аргона (Ar)	1045	58	16572
3	Фрезерование (Ф)	1065	48	26600
4	ГЛР (N) + Отжиг, 650 °С, 1 ч, воздух + опескоструивание (O, Воз, П)	1085	35	2263540
5	ГЛР + (N) + Отжиг, 650° С, 1 ч, вакуум (O, Вак)	1055	38	65462
6	ГЛР (Ar) + (O, Воз, П)	1070	45	1215234
7	ГЛР (Ar) + (O, Вак)	1060	52	75210
8	(Ф) + (O, Воз)	1075	44	112253
9	(Ф) + (O, Воз, П)	1060	40	2575647
10	(Ф) + (O, Вак)	1050	44	81966
11	ГЛР (N) + Сварка (С)	1070	57	41280
12	ГЛР (N) + (С) + (O, Воз, П)	1100	50	>1300110
13	ГЛР (Ar) + (С)	1065	48	55414
14	ГЛР (Ar) + (С) + (O, Воз, П)	1080	46	>1111647
15	(Ф) + (С)	1040	50	39285
16	(Ф) + (С) + (O, Воз, П)	1075	43	>1081070

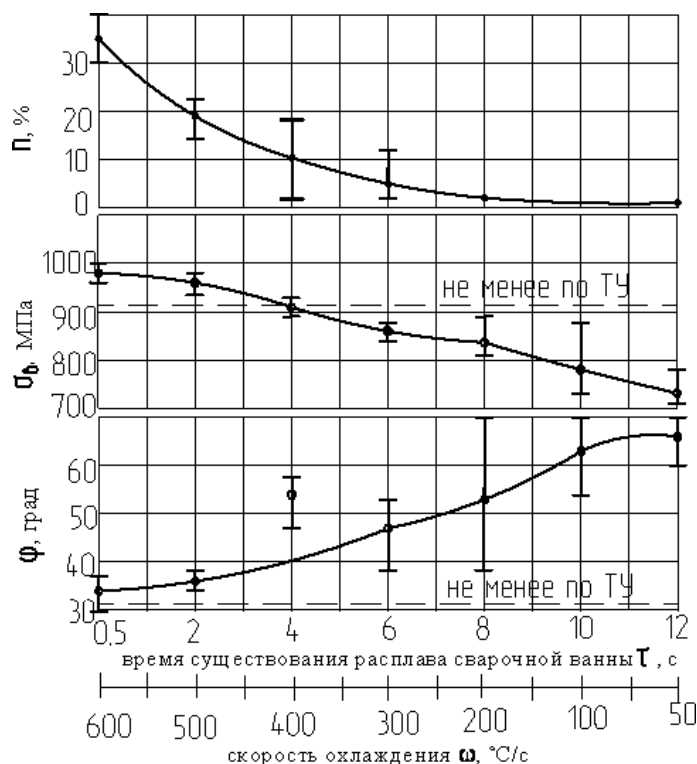


Рис. 5. Изменение механических свойств сварных (σ_b , ϕ) образцов из титанового сплава ВТ20 и количества пор (n) на 100мм сварного шва в зависимости от времени существования расплава сварочной ванны (τ) и скорости охлаждения (ω) в интервале полиморфного β - α превращения

Таблица 7

Изменение химического состава и механических свойств металла шва сплава ВТ20 в зависимости от ТЦС

№	Режим ТЦС		Содержание в процентах							Механические свойства	
	Скорость сварки $V_{св}$, см/с	Скорость охлаждения ω	Al	Mo	V	Zr	H ₂	O ₂	N ₂	σ_B , МПа	Угол загиба, град
1	0,095	127,0	4,11	0,18	0,64	0,93	0,0022	0,063	0,006	720	67
2	0,138	185,0	4,55	0,38	0,79	1,06	0,0028	0,069	0,008	830	56
3	0,208	430,0	4,81	0,48	0,78	1,10	0,0036	0,077	0,009	930	50
4	0,556	558,9	6,23	0,58	1,25	1,79	0,0023	0,064	0,009	1050	44
5	0,417	550,9	6,51	0,69	1,19	1,58	0,0011	0,072	0,010	1065	41
6	Основной металл		6,45	0,60	1,29	1,87	0,0012	0,067	0,003	1050	45

влаги.

Расчетами установлено, что температурное поле, достаточное для удаления капиллярно-конденсированной влаги с поверхности заготовок, находится в диффузионной зоне соединения, где происходит полное смятие выступов шероховатости микронадрывов и образование замкнутых полостей, заполненных влагой.

Регулярное чередование выступов на поверхности титановых заготовок, образованных газолазерным раскроем (ГЛР), и их высокая твердость, практически сохраняющаяся до температуры плавления, позволяют полностью удалить капиллярно-конденсированную влагу с поверхности ответной заготовки, полученную раскроем на ножницах гильотинного типа, и получить металл шва высокой плотности без пор. В последнем случае поры образуются при использовании некачественной присадочной проволоки.

Сравнительная оценка распределения температурного поля по объему расплавленной ванны, времени её существования и времени всплытия газовых пузырьков (см. табл. 3) показывает, что для полного удаления газовых пузырьков в зависимости от определенных условий (места ввода присадочной проволоки в ванну, рубки заготовок на ножницах гильотинного типа и др.) требуется довольно значительное время существования ванны в расплавленном состоянии. Последнее приводит к существенному изменению геометрических размеров металла шва (см. табл. 4).

Расчеты скорости охлаждения в интервале температуры полиморфного превращения показали их существенную зависимость от термического цикла сварки, т.е. от времени существования расплавленной ванны, чем оно дольше, тем медленнее скорость охлаждения (см. табл. 5).

Скорость охлаждения в интервале T_{np} определяет свойства металла шва титановой конструкции, что подтверждается экспериментальными исследованиями (см. рис. 5).

Большинство технологических операций изгото-

вления титановых конструкций приводит к накоплению остаточных растягивающих напряжений, что снижает показатели сопротивления усталости (см. табл. 6). Вакуумный отжиг полностью снимает внутренние напряжения, и практически сопротивление усталости увеличивается на 10-12% по сравнению с исходным состоянием. Отжиг в воздушной среде приводит к некоторому увеличению сжимающих напряжений и к увеличению сопротивления усталости по сравнению с вакуумным отжигом. Опескоструивание после отжига в воздушной среде создает значительные сжимающие остаточные напряжения, что приводит к увеличению сопротивления усталости более чем на два порядка по сравнению с исходным состоянием.

При циклическом нагружении при постоянном уровне переменного напряжения ($\sigma_m = (0,70\sigma_{bp} + 0,49\sigma_{br})/2 = 654$ МПа) в материале протекают вначале процессы накопления необратимой повреждаемости (см. рис. 6), и при достижении некоторого критического уровня плотности дефектов происходит возникновение начальной поверхностной трещины или зоны очага разрушения.

Экспериментальными исследованиями была установлена удовлетворительная сходимость с ранее высказанными положениями М.Х. Шоршорова и В.И. Добаткина улучшения свойств металла шва после увеличения скорости охлаждения из β -области и последующего отжига. Улучшение свойств металла шва объясняется получением мелкозернистой структуры и изменением толщины и ориентировки α -пластин в процессе охлаждения (см. рис. 7).

Газолазерный раскрой титановых заготовок позволяет полностью исключить порообразование в металле шва, а уменьшение времени существования расплавленной ванны и увеличение скорости и охлаждения приводят к улучшению структуры и свойств металла шва, близких к свойствам основного металла.

Уменьшение скорости охлаждения за счет увеличения времени существования расплавленной ванны может привести к снижению прочности металла шва бо-

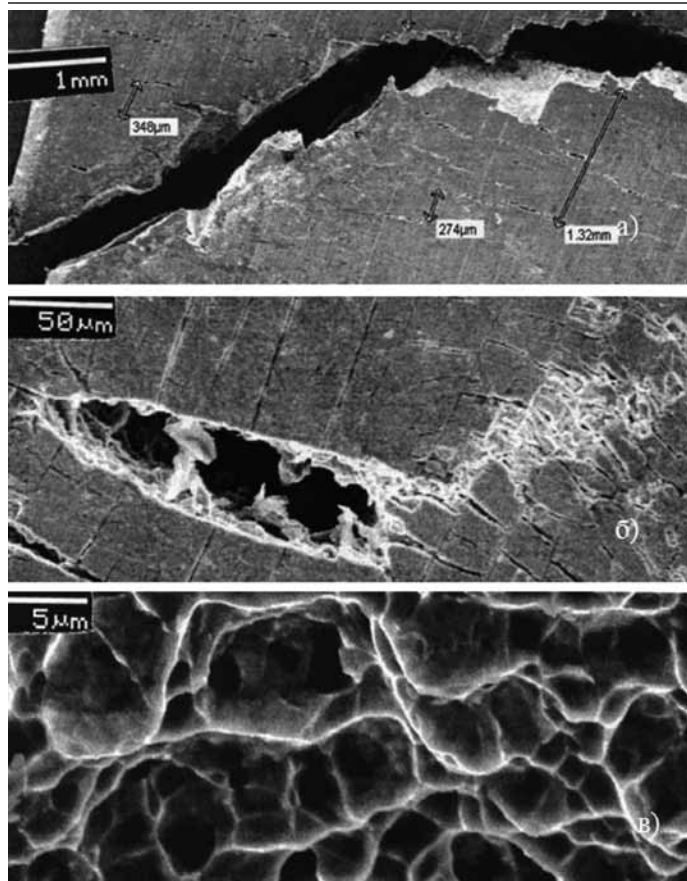


Рис. 6. Вид поверхности образца после усталостных испытаний (а, б) с участками накопления необратимой повреждаемости оксидной пленки и образованием микротрещин и поверхности излома (в) с характерным для усталостного разрушения ямочным рельефом

лее чем на 10-25% по сравнению с основным металлом из-за укрупнения зерна и изменения химического состава (см. табл. 7 п. 1-3).

Выводы

1. Сравнительными исследованиями механических свойств основного металла и металла шва листовых заготовок различных толщин и плавок по результатам входного и технологического контроля конкретных деталей ЛА за пятилетний период установлено, что для толщин 1,2 мм и 2,0 мм вне зависимости от химического состава металла шва и основного металла они практически не различаются. Однако для толщин 2,5 мм и 3,0 мм независимо от химического состава свойства металла шва ниже свойств основного металла и в некоторых случаях более чем на 10-15%. Изменение режимов ТЦС на форсированные для этих толщин привело к увеличению временного сопротивления разрыву металла шва по сравнению с основным металлом более чем на 15% и незначительному уменьшению угла загиба. Из проведенных исследований следует, что механические свойства металла шва титановых сплавов определяются процессами ТЦС.

2. Установлено, что температурное поле, достаточное для удаления капиллярно-конденсированной влаги с поверхности заготовок, находится в диффузионной зоне

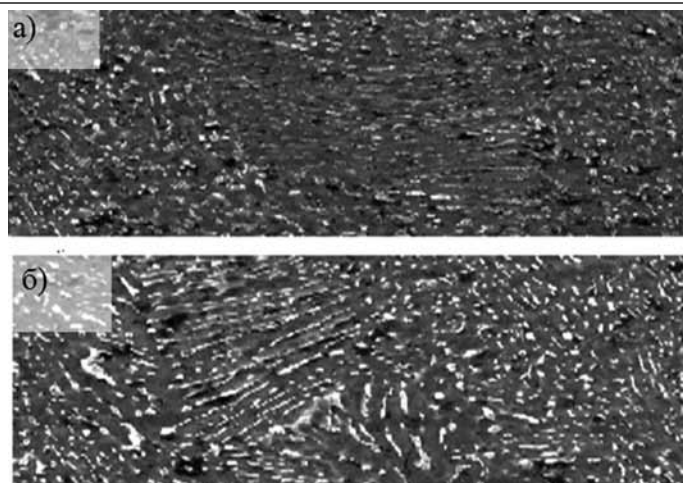


Рис. 7. Микроструктура металла шва титанового сплава ВТ20: а — время существования ванны $t=1,05$ с, скорость охлаждения $w=150,5$ °C/с; б — время существования ванны $t=0,23$ с; скорость охлаждения $w=596$ °C/с

соединения, где происходит полное смятие выступов шероховатости микронадрывов и образование замкнутых полостей, заполненных влагой. Регулярное чередование выступов на поверхности титановых заготовок, образованных ГЛР, и их высокая твердость, практически сохраняющаяся до температуры плавления, позволяют полностью удалить капиллярно-конденсированную влагу с поверхности ответной заготовки, полученную раскроем на ножницах гильотинного типа, и получить металл шва высокой плотности без пор. В последнем случае поры образуются в случае использования некачественной присадочной проволоки.

3. Исследование механических свойств при статических, повторно-статических и виброиспытаниях титановых конструкций показали, что конструкции, изготовленные при применении оптимальных режимов ТЦС и термообработки, не уступают конструкциям, изготовленным по традиционной технологии из цельного металла.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Редниц, В. В., Фролов, В. А., Казаков, В. А., Лукин, В. И. Пористость при сварке цветных металлов. М.: Издательский центр «Технология машиностроения». 2002. — 448 с.
- 2 Муравьев, В. И., Фузулаков, Р. А., Мельничук, А. Ф. Исследование влияния газа-зернового раскроя на формирование рельефа, структуры и химического состава поверхности реза титановых заготовок // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2005. №2. — С. 22-25.
- 3 Лозеев, Г. Е. Способ уменьшения пористости в сварных швах // *Сварочное производство*. —1975. №8. —С. 31-33.
- 4 Долотов, Б. И., Муравьев, В. И., Марьин, Б. Н. и др. О возможности получения плотных швов на титановых сплавах // *Сварочное производство*. —1996, № 12. —С. 6-8.
- 5 Шоршоров, М. Х., Мещяряков, В. Н. Фазовые превращения и изменения свойств сплавов титана при сварке. Атлас. М.: «Наука». 1973. — 160 с.