



УДК 669.295

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-5-2-2

**АНАЛИЗ ОСТАТОЧНЫХ МАКРОНАПРЯЖЕНИЙ В
СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ
РАЗНЫХ КЛАССОВ**

Н.А. Ночовная

доктор технических наук

П.В. Панин

кандидат технических наук

Май 2014

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.

Н.А. Ночовная¹, П.В. Панин¹

АНАЛИЗ ОСТАТОЧНЫХ МАКРОНАПРЯЖЕНИЙ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ РАЗНЫХ КЛАССОВ

Приведен анализ величины и характера распределения остаточных макронапряжений по сечению сварных соединений титановых сплавов VT20, VT6 и VT23, полученных методами аргоно-дуговой и электронно-лучевой сварки. Показано, что независимо от применяемого метода сварки в центре сварного шва действуют растягивающие напряжения, которые переходят в сжимающие в зоне термического влияния. Установлено, что относительный уровень растягивающих напряжений в сварных соединениях исследуемых сплавов снижается с увеличением коэффициента β -стабилизации сплава.

Ключевые слова: *титановые сплавы, остаточные макронапряжения, сварное соединение, аргоно-дуговая электросварка, электронно-лучевая сварка.*

N.A. Nochovnaya¹, P.V. Panin¹

RESIDUAL MACROSTRESS ANALYSIS IN WELDED JUNCTIONS OF DIFFERENT TITANIUM ALLOYS

In the present work residual stress analysis has been accomplished for welded junctions of the VT20 (Ti–6Al–2Zr–1V–1Mo), VT6 (Ti–6Al–4V), and VT23 (Ti–5.5Al–4.5V–2Mo–1Cr–0.5Fe) alloys wherein macrostress values and distribution thereof along the cross-section of welded junctions were in focus. It has been shown that tension stresses occur in the center of weld joints while compression stresses are detected in heat-affected zones independently of argon-arc or electron-beam welding method applied. For the studied alloys the following regularity has been revealed: the relative tension stress level decreases with the β -stabilizing coefficient increase.

Keywords: *titanium alloys, residual macrostress, welded junction, argon-arc welding, electron-beam welding.*

¹ 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

Развитие отечественной авиационной отрасли стимулируется комплексом мер государственной поддержки, включающих, в частности, ряд целевых программ, направленных на развитие материаловедения и разработку новых материалов для перспективных воздушных судов как военного, так и гражданского назначения.

Авиационное материаловедение играет одну из ключевых ролей в развитии авиации и является определяющим фактором при создании новых образцов авиационной и космической техники. С целью упорядочения и выбора наиболее важных направлений развития материаловедения в ВИАМ разработаны Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года [1], где большое внимание уделено легким сплавам, в частности титановым [1–4].

Титан и сплавы на его основе являются одними из наиболее востребованных материалов как в авиационном машиностроении (для обеспечения высоких удельных характеристик [5–8]), так и в других областях (например, в медицине, при производстве конструкций эндопротезов, где требуется одновременно обеспечить высокую надежность и биологическую совместимость). Для достижения наибольшей весовой эффективности сборных конструкций целесообразно заменять механические соединения на сварные, что дает существенное снижение массы вследствие отсутствия дополнительных деталей крепления [9, 10]. Для титановых сплавов в большинстве случаев сварка осуществляется одним из методов сварки плавлением [10, 11]. Так, крупногабаритные шпангоуты из высокопрочного сплава ВТ23 получают методом электронно-лучевой сварки (ЭЛС), а компоненты эндопротезов из сплавов ВТ20 и ВТ6 – аргоно-дуговой электро-сваркой (АрДЭС).

Любые виды сварки плавлением приводят к формированию макронапряжений в сварных соединениях [9–13], что негативно отражается на комплексе технологических и эксплуатационных свойств, и в первую очередь – на конструкционной прочности и надежности. Вследствие этого, данная работа посвящена изучению характера распределения остаточных макронапряжений по сечению сварных соединений титановых сплавов разных классов (ВТ20, ВТ6, ВТ23), полученных методами АрДЭС и ЭЛС, с целью проведения сравнительного анализа и выявления закономерностей.

Объекты и методы исследования

Исследования проводили на крупногабаритных полуфабрикатах из титановых сплавов ВТ20, ВТ6 и ВТ23, подвергнутых различным видам сварки: аргоно-дуговой электросварке нерасходуемым вольфрамовым электродом (для сплавов ВТ6 и ВТ20) и

автоматической электронно-лучевой сварке в вакууме (для сплава ВТ23). Химический состав сплавов, а также вид и толщина свариваемых полуфабрикатов приведены в таблице.

Химический состав и вид полуфабрикатов исследуемых титановых сплавов

Сплав	Класс сплава (коэффициент β -стабилизации)	Полуфабрикат (толщина)	Содержание легирующих элементов*, % (по массе)					
			Al	V	Mo	Zr	Cr	Fe
ВТ20	Псевдо- α ($K_{\beta}=0,18$)	Плита ($h=20$ мм)	5,9	1,2	1,5	1,8	–	–
ВТ6	$\alpha+\beta$ ($K_{\beta}=0,27$)	Плита ($h=12$ мм)	6,25	4,1	–	–	–	0,11
ВТ23	$\alpha+\beta$ ($K_{\beta}=0,75$)	Плита ($h=80$ мм)	5,5	4,5	2,0	–	1,0	0,6

* Основа сплавов – титан; примеси – в соответствии с ГОСТ 19807–91.

Режимы выбранных методов сварки соответствовали режимам, применяемым при промышленном изготовлении сварных конструкций из крупногабаритных полуфабрикатов титанового сплава ВТ23, а также в мелкосерийном производстве компонентов эндопротезов из сплавов ВТ20 и ВТ6. Для проведения исследований после сварки из заготовок вырезали образцы размером $25 \times 40 \times 15$ мм таким образом, чтобы сварной шов всегда находился в центре образца.

Анализ внутренних напряжений проводили рентгеновским методом « $\sin^2\psi$ » [14, 15] на дифрактометрах ДРОН-4 и ДРОН-7 в $\text{Cu } K_{\alpha}$ -излучении: определяли межплоскостные расстояния для рефлекса (21.3) α -фазы при симметричной ($\psi=0$ град) и несимметричной (ψ : -10, -30, -50 град) съемке в интервале углов дифракции $2\theta=134\text{--}150$ град. Напряжения анализировали в трех областях каждого образца – в центре сварного шва (СШ), в зоне термического влияния (ЗТВ; на расстоянии 5–10 мм от центра шва) и в основном металле (ОМ; на расстоянии >15 мм от центра шва). При расчете напряжений учитывали анизотропию упругих констант, которые вычисляли через элементарные модули податливости. Для направления нормали к плоскости (21.3) значения модуля упругости и коэффициента Пуассона составили 110 ГПа и 0,33 соответственно. По результатам экспериментов построены эпюры распределения напряжений в поперечном сечении шва в зависимости от расстояния от его центра.

Результаты и обсуждение

Наличие макронапряжений в сварных соединениях металлов и сплавов, выполненных сваркой плавлением, является одним из наиболее значимых негативных факторов большинства сварочных технологий [9]. Опасность формирования остаточных напря-

жений в сварных конструкциях в полной мере относится и к сплавам на основе титана [10, 12, 13].

Причиной формирования остаточных сварочных макронапряжений являются значительные локальные упругие деформации, которые возникают вследствие усадки расплавленного металла в сварочной ванне и термического расширения/сжатия в прилегающих областях, не претерпевших расплавления. Накопленная упругая деформация не исчезает после полного завершения сварочного цикла и снятия температурных деформаций – так формируются сварочные макронапряжения, величина которых зависит от температурно-временного режима сварки и от химического и фазового состава (класса) свариваемого сплава.

Основным критерием оценки остаточных напряжений в сварных конструкциях принято считать количественную величину максимальных растягивающих напряжений, действующих в направлении длины шва [9, 10]. Именно эти напряжения ответственны за работоспособность сварной конструкции, так как они, аддитивно складываясь с напряжениями от внешних нагрузок, могут достигать предела текучести материала, что приводит к разрушению.

В зависимости от того, как ориентированы оси действия напряжений относительно продольного направления СШ, различают продольные и поперечные напряжения. Известно [10, 11], что в сварных соединениях продольные и поперечные напряжения, действующие в зоне СШ, являются растягивающими, но отличаются по величине. В первом приближении их можно соотнести с главными нормальными напряжениями, действующими в поверхностном слое (~ 20 мкм)* при плоском напряженном состоянии (σ_x и σ_y соответственно). Рентгеновский метод позволяет определить как сумму главных напряжений в поверхностном слое ($\sigma_\phi = \sigma_1 + \sigma_2$), так и каждую компоненту в отдельности [14], что и было сделано для образцов, вырезанных из плиты сплава ВТ23 после ЭЛС. На рис. 1 приведена эпюра, отражающая распределение растягивающих сварочных напряжений в поверхностном слое исследуемых образцов из сплава ВТ23 в области сварного шва и околшовной зоны.

* Толщина поверхностного слоя соответствует информационной глубине рентгеноструктурного метода анализа (~ 20 мкм для излучения $\text{Cu } K_\alpha$).

Показано, что действующие вдоль длины шва продольные растягивающие напряжения (+270 МПа) в среднем на 10% меньше поперечных напряжений (+300 МПа). Такая зависимость характерна как для лицевой поверхности с вершиной шва, так и для обратной поверхности, где расположен корень шва. В связи с этим, в дальнейшем анализировали поперечные напряжения, величина которых, как показывают результаты эксперимента, заведомо больше величины продольных напряжений.

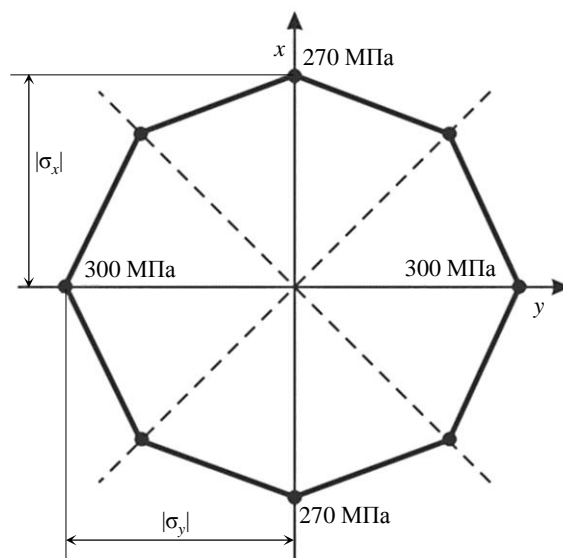


Рисунок 1. Распределение растягивающих сварочных напряжений в поверхностном слое плиты из сплава BT23 после ЭЛС:

x, y – осевое и поперечное направления сварного шва соответственно

Из дуговых способов сварки титана самым распространенным является дуговая электросварка в среде инертных газов [9–11]. При изготовлении компонентов эндопротезов из титановых сплавов применяется дуговая сварка в камерах с контролируемой атмосферой аргона 1-го сорта или гелия высокой чистоты. Так, в конструкции онкологического эндопротеза тазобедренного сустава присутствует сварное соединение, выполненное ручной АрДЭС с применением неплавящегося вольфрамового электрода. Материалом для таких протезов служат титановые сплавы BT20 и BT6, широко распространенные в медицинской практике.

Проведенные исследования сварных соединений сплавов BT20 и BT6, полученных методом АрДЭС, показали, что внутренние напряжения в СШ и ЗТВ носят переменный характер и изменяются от растягивающих в центре СШ до сжимающих на границе ЗТВ и околошовной зоны.

В сварном соединении сплава BT20 остаточные напряжения изменяются от +290 до -240 МПа (рис. 2, кривая 1); в сплаве BT6 соответствующие значения не превышают

+270 МПа в СШ и -200 МПа в ЗТВ (рис. 2, кривая 2), что качественно и количественно согласуется с данными, представленными в работах [10, 12, 13]. Более низкий абсолютный уровень напряжений в ($\alpha+\beta$)-сплаве ВТ6 объясняется протеканием в нем полиморфного $\beta\rightarrow\alpha$ -превращения в процессе охлаждения после сварки, которое способствует значительной релаксации временных напряжений [10].

Электронно-лучевая сварка титановых сплавов применяется в авиастроении при изготовлении сложных и ответственных конструкций толщиной до 200 мм [10, 11, 16]. В последнее время все более широко ЭЛС применяют при производстве конструкций из высоколегированных сплавов титана, в том числе из термически упрочняемых двухфазных сплавов, таких как высокопрочный сплав ВТ23.

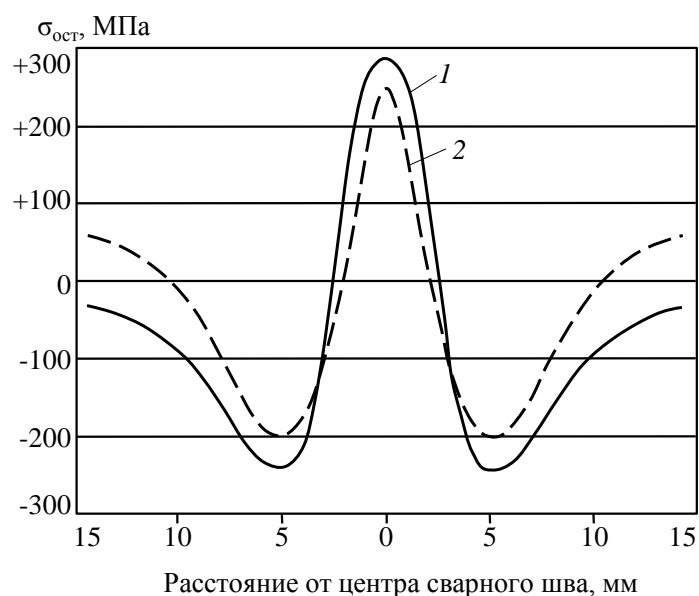


Рисунок 2. Эпюра распределения остаточных напряжений в сварных соединениях сплавов ВТ20 (1) и ВТ6 (2) после АрДЭС (в сечении, перпендикулярном сварному шву)

Плотность энергии электронного луча при ЭЛС достигает $5 \cdot 10^3$ кВт/мм², что в несколько тысяч раз превышает плотность энергии при дуговой сварке [9]. В связи с этим в процессе ЭЛС происходит очень интенсивный локальный разогрев сварочной ванны с последующим образованием узкого и глубокого шва в виде клина (так называемый «кинжальный проплав») [9, 10]. Площадь зоны проплавления при ЭЛС в ~25 раз меньше, чем при АрДЭС, что в совокупности с высокой концентрацией энергии в луче приводит к образованию относительно узкой зоны термического влияния при высокой скорости охлаждения, что способствует формированию значительных по величине внутренних напряжений.

Проведенные исследования показали, что в полуфабрикатах из сплава ВТ23 после ЭЛС остаточные напряжения достигают 310 МПа и изменяются от растягивающих в СШ до сжимающих в ЗТВ (рис. 3, *а*). Металлографический анализ, а также распределение твердости, измеренной по методу Роквелла (HRC) по сечению сварного шва (рис. 3, *б*), свидетельствуют о неоднородности структуры СШ, ЗТВ и ОМ, что также объясняется условиями охлаждения после ЭЛС.

Наиболее распространенным видом термической обработки сварных соединений металлов и сплавов является отжиг для снятия напряжений [10, 16, 17]. Для титанового сплава ВТ23 рекомендуется [16, 17] проводить отжиг в среднем температурном интервале ($\alpha+\beta$)-области с последующим охлаждением на спокойном воздухе. Так, отжиг при температуре 750°C в течение 4 ч приводит к практически полному снятию напряжений по сечению СШ и ЗТВ: растягивающие поперечные напряжения в центре шва не превышают +30 МПа (см. рис. 3, *а*).

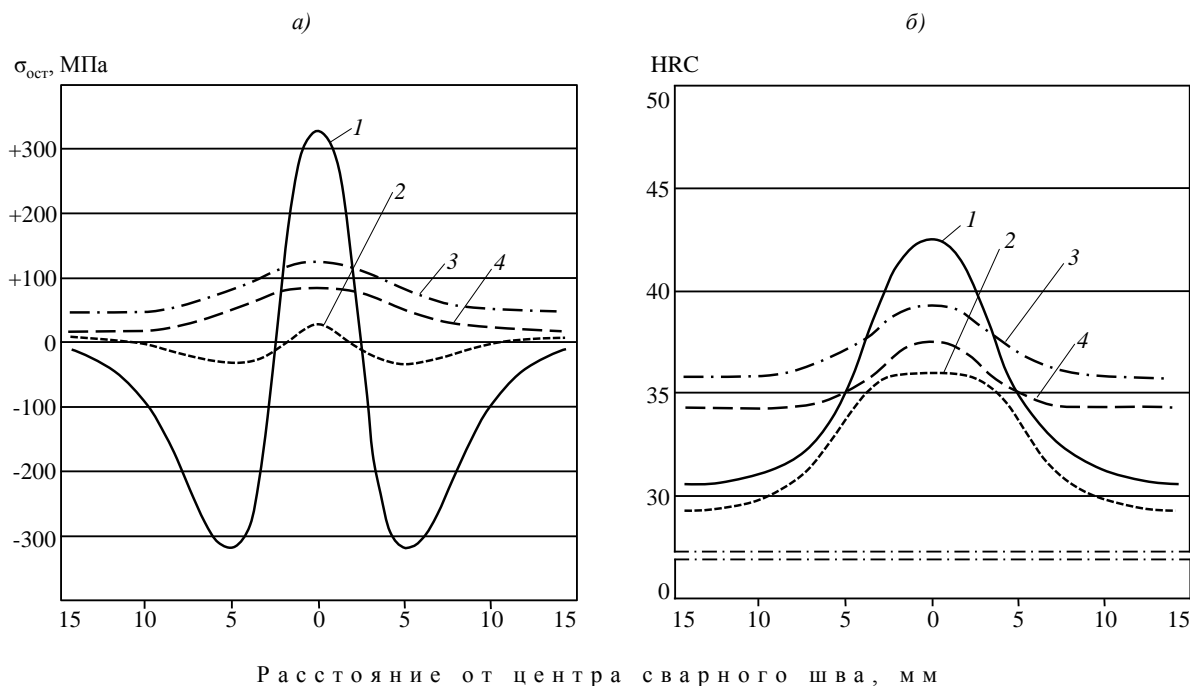


Рисунок 3. Распределение макронапряжений (*а*) и твердости (*б*) по сечению сварного шва и околошовной зоны в сварном соединении сплава ВТ23 после ЭЛС (*1*); термообработки по режиму: 750°C, 4 ч, охлаждение на воздухе (*2*); 860°C, 3 ч + 575°C, 4 ч, охлаждение на воздухе (*3*), а также после вакуумного отжига при 860°C, 3 ч + 575°C, 4 ч, охлаждение в печи (*4*)

Релаксация макронапряжений при термической обработке может происходить двумя путями – за счет пластической деформации (при высоко- и среднетемпературных отжигах) и в результате ползучести (при низкотемпературной обработке – старении). Для конструкционных титановых сплавов за условную температурную границу прини-

мают критическую точку $0,7A_{c3}$, когда предел текучести заметно снижается по сравнению со значениями при комнатной температуре. Так, при температурах $700-750^{\circ}\text{C}$ предел текучести сплава ВТ23 уменьшается настолько, что в условиях действия полей упругих деформаций (остаточных напряжений) начинается интенсивное возникновение дислокаций и их скольжение. Пластическая деформация в «напряженных» микрообъемах приводит к высвобождению избыточной энергии и релаксации напряжений. При этом степень «разрядки» напряжений определяется температурой отжига и не зависит от его продолжительности, что подтверждено экспериментально – уровень и характер распределения напряжений остаются неизменными при увеличении времени выдержки до 8 ч и более.

Практически полное снятие напряжений в сварном соединении сплава ВТ23 после отжига в среднем температурном интервале ($\alpha+\beta$)-области сопровождается снижением уровня прочностных свойств. Авторами работ [18–23] проведены исследования по изучению влияния различных режимов термической обработки на структуру и свойства крупногабаритных полуфабрикатов, в том числе сварных, из сплава ВТ23. Показано, что наиболее приемлемый уровень механических свойств ($\sigma_b \geq 1100$ МПа, $KCU \geq 0,35$ МДж/м²) и достаточно полное снятие сварочных напряжений могут быть обеспечены с помощью термической обработки, включающей высокотемпературный отжиг (860°C , 3 ч) и низкотемпературное старение (575°C , 4 ч); последующее охлаждение при этом может быть осуществлено как на воздухе, так и с печью. Максимальный уровень растягивающих напряжений после такой двухступенчатой обработки снижается до 90–130 МПа (см. рис. 3, а), что исключает разрушение в процессе эксплуатации.

Анализ научной литературы и результаты проведенных исследований позволяют выделить следующие основные закономерности формирования остаточных напряжений при сварке:

- величина напряжений зависит от вида и режимов сварки;
- в центре сварного шва формируются наиболее опасные растягивающие напряжения, которые переходят в сжимающие в зоне термического влияния;
- на величину напряжений оказывает влияние химический и фазовый состав свариваемых материалов.

Применительно к рассматриваемым титановым сплавам выявленные закономерности можно интерпретировать следующим образом: влияние вида сварки и фазового состава сплавов на величину остаточных напряжений показано в виде характерной гистограммы (рис. 4), построенной по результатам проведенных исследований и с учетом

литературных данных. Гистограмма представляет собой зависимость максимальных растягивающих напряжений от химического состава сплавов, выраженного коэффициентом β -стабилизации (K_β).

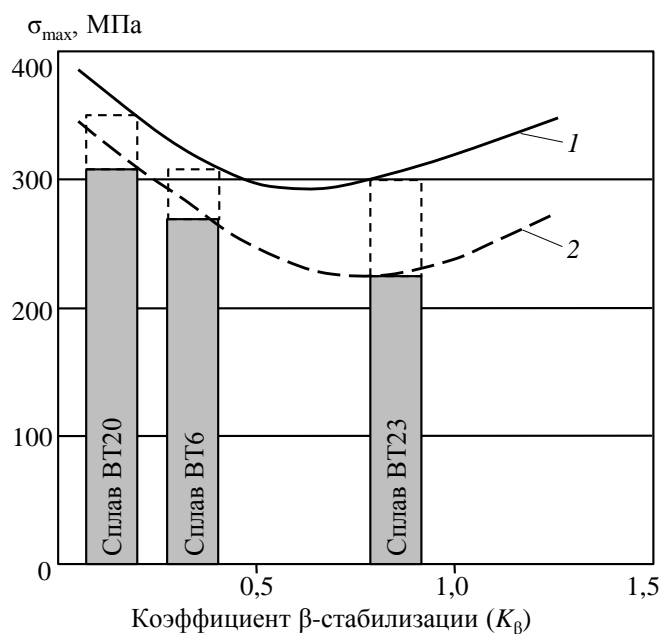


Рисунок 4. Изменение величины максимальных остаточных напряжений в сварных соединениях в зависимости от коэффициента β -стабилизации K_β при сварке методами ЭЛС (1) и АрДЭС (2)

Анализ данной зависимости позволяет сделать вывод о том, что после АрДЭС максимальные остаточные напряжения в среднем на 10% ниже, чем после ЭЛС независимо от класса сплава. Кроме того, в двухфазных сплавах растягивающие напряжения, сформированные в процессе сварки, частично релаксируют за счет протекания фазового превращения при охлаждении, поэтому средний уровень напряжений в $(\alpha+\beta)$ -сплавах на 10–15% ниже, чем в псевдо- α -сплавах, что также подтверждается экспериментально.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Антипов В.В. Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 157–167.
3. Тарасов Ю.М., Антипов В.В. Новые материалы ВИАМ – для перспективной авиационной техники производства ОАО «ОАК» //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 5–6.

4. Шмотин Ю.Н., Старков Р.Ю., Данилов Д.В., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Новые материалы для перспективного двигателя ОАО «НПО „Сатурн”» //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 6–8.
5. Ночовная Н.А. Перспективы и проблемы применения титановых сплавов /В сб. Авиационные материалы и технологии. Вып. «Перспективы развития и применения титановых сплавов для самолетов, ракет, двигателей и судов»: Сб. докладов юбилейного совещания, посвященного 55-летию титановой лаборатории. М.: ВИАМ. 2007. С. 4–8.
6. Петухов А.Н. Актуальные вопросы конструкционной прочности титановых сплавов и деталей из них /В сб. Авиационные материалы и технологии. Вып. «Перспективы развития и применения титановых сплавов для самолетов, ракет, двигателей и судов»: Сб. докладов юбилейного совещания, посвященного 55-летию титановой лаборатории. М.: ВИАМ. 2007. С. 8–13.
7. 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).
8. Хорев А.И. Теория и практика создания современных комплексно-легированных титановых сплавов для авиакосмической и ракетной техники /В сб. трудов Международной конф. «Ti-2009 в СНГ». 2009. С. 288–301.
9. Фролов В.А. Технология сварки плавлением и термической резки металлов: Учеб. пособ. М.: Альфа М, Инфра-М. 2011. 447 с.
10. Лясоцкая В.С. Термическая обработка сварных соединений титановых сплавов. М.: Экомет. 2003. 352 с.
11. Винокуров В.А. Сварные конструкции. М. 1982. 354 с.
12. Плихунов В.В., Бецофен С.Я., Мамонов А.М., Спектор В.С. Исследование закономерностей формирования структуры и внутренних напряжений в сварных соединениях из титанового сплава BT20 //Металлы. 2007. №5. С. 104–109.
13. Золоторевский Б.Б., Шубладзе Т.Г., Тихонова А.Ф. Остаточные напряжения и деформации в сварных соединениях титанового сплава BT6 //Сварочное производство. 1982. №1. С. 23–25.
14. Горелик С.С., Скаков Ю.А., Расторгуев Л.Н. Рентгенографический и электронно-оптический анализ: Учеб. пособ. для вузов. 4-е изд., доп. и перераб. М.: «МИ-СиС». 2002. 360 с.

15. Чабина Е.Б., Алексеев А.А., Филонова Е.В., Лукина Е.А. Применение методов аналитической микроскопии и рентгеноструктурного анализа для исследования структурно-фазового состояния материалов //Труды ВИАМ. 2013. №5. Ст. 06 (viam-works.ru).
16. Моисеев В.Н., Куликов Ф.Р., Кириллов Ю.Г., Шолохова Л.В., Васькин Ю.В. Сварные соединения титановых сплавов. М.: Металлургия. 1979. 248 с.
17. Хорев М.А., Иода А.В., Красножон А.И. Механические свойства и структура сварных соединений из титанового сплава ВТ23, выполненных электронно-лучевой сваркой //Сварочное производство. 1981. №7. С. 25–26.
18. Ильин А.А., Скворцова С.В., Попова Ю.А., Куделина И.М. Влияние термической обработки на формирование структуры и свойств крупногабаритных полуфабрикатов из сплава ВТ23 //Титан. 2010. №4. С. 48–53.
19. 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.
20. Скворцова С.В., Мамонов А.М., Панин П.В., Грушин И.А., Петров А.А. Влияние термической обработки на формирование структуры и комплекса механических свойств крупногабаритных полуфабрикатов из титанового сплава ВТ23 /В сб. тезисов докл. седьмого Международного аэрокосмического конгресса IAC'12. 2012. С. 193–194.
21. Панин П.В., Дзунович Д.А., Куделина И.М., Грушин И.А. Термическая обработка крупногабаритных полуфабрикатов высокопрочного титанового сплава ВТ23 /В сб. материалов Всероссийской науч.-технич. конф. «НМТ–2012». 2012. С. 80–81.
22. Грушин И.А., Крылов С.А., Попова Ю.А. Изучение макронапряжений в сварных соединениях титанового сплава ВТ23 /В сб. тезисов докладов ММНК «XXXVII Гагаринские чтения». Т.1. 2011. С. 129–131.
23. Грушин И.А., Мамонтова Н.А., Курышев Е.А. Термическая обработка сварных соединений крупногабаритных полуфабрикатов титанового сплава ВТ23, полученных электронно-лучевой сваркой /В сб. тезисов докладов ММНК «XXXVIII Гагаринские чтения». Т.1. 2012. С. 28–29.

REFERENCES LIST

1. Kablov E.N. Strategicheskie napravlenija razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda [Strategic directions of development of materials and technolo-

- gies to process them for the period up to 2030] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 7–17.
2. Antipov V.V. Strategija razvitija titanovyh, magnievyh, berillievyh i aljuminievyh splavov [The development strategy of titanium, magnesium, beryllium and aluminum alloys] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 157–167.
 3. Tarasov Ju.M., Antipov V.V. Novye materialy VIAM – dlja perspektivnoj aviacionnoj tehniki proizvodstva OAO «OAK» [New materials VIAM – for advanced aircraft produced by JSC «UAC»] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №2. S. 5–6.
 4. Shmotin Ju.N., Starkov R.Ju., Danilov D.V., Ospennikova O.G., Lomborg B.S. Novye materialy dlja perspektivnogo dvigatelja OAO «NPO „Saturn”» [New materials for advanced engine JSC «NPO „Saturn”»] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №2. S. 6–8.
 5. Nochovnaja N.A. Perspektivy i problemy primenenija titanovyh splavov [Prospects and problems of application of titanium alloys] /V sb. Aviacionnye materialy i tehnologii. Vyp. «Perspektivy razvitija i primenenija titanovyh splavov dlja samoletov, raket, dvigatelej i sudov»: Sb. dokladov jubilejnogo soveshhanija, posvjashhennogo 55-letiju titanovoj laboratorii. M.: VIAM. 2007. S. 4–8.
 6. Petuhov A.N. Aktual'nye voprosy konstrukcionnoj prochnosti titanovyh splavov i detalej iz nih [Topical issues of structural strength titanium alloys, and parts of them] /V sb. Aviacionnye materialy i tehnologii. Vyp. «Perspektivy razvitija i primenenija titanovyh splavov dlja samoletov, raket, dvigatelej i sudov»: Sb. dokladov jubilejnogo soveshhanija, posvjashhennogo 55-letiju titanovoj laboratorii. M.: VIAM. 2007. S. 8–13.
 7. Horev A.I. Fundamental'nye i prikladnye raboty po konstrukcionnym titanovym splavam i perspektivnye napravlenija ih razvitija [Fundamental and applied research in structural titanium alloys and future directions of their development] //Trudy VIAM 2013. №2. St. 04 (viam-works.ru).
 8. Horev A.I. Teorija i praktika sozdanija sovremennyh kompleksno-legirovannyh titanovyh splavov dlja aviakosmicheskoj i raketnoj tehniki [Theory and practice of modern complex-doped titanium alloys for aerospace and rocketry] /V sb. trudov Mezhdunarodnoj konf. «Ti-2009 v SNG». 2009. S. 288–301.
 9. Frolov V.A. Tehnologija svarki plavljeniem i termicheskoj rezki metallov [Technology fusion welding and thermal cutting]: Ucheb. posob. M.: Al'fa M, Infra-M. 2011. 447 s.
 10. Ljasockaja V.S. Termicheskaja obrabotka svarynyh soedinenij titanovyh splavov [Heat treatment of welded joints of titanium alloys]. M.: Jekomet. 2003. 352 s.

11. Vinokurov V.A. Svurnye konstrukcii [Weldments]. M. 1982. 354 s.
12. Plihunov V.V., Becofen S.Ja., Mamonov A.M., Spektor V.S. Issledovanie zakonomenostej formirovanija struktury i vnutrennih naprjazhenij v svarnyh soedinenijah iz titanovogo splava VT20 [Investigation of regularities of formation of structure and internal stresses in welded joints of titanium alloy VT20] //Metally. 2007. №5. S. 104–109.
13. Zolotorevskij B.B., Shubladze T.G., Tihonova A.F. Ostatochnye naprjazhenija i deformacii v svarnyh soedinenijah titanovogo splava VT6 [Residual stress and strain in the welded joints of titanium alloy VT6] //Svarochnoe proizvodstvo. 1982. №1. S. 23–25.
14. Gorelik S.S., Skakov Ju.A., Rastorguev L.N. Rentgenograficheskiy i jelektronno-opticheskiy analiz [X-ray and electron-optical analysis]: Ucheb. posob. dlja vuzov. 4-e izd., dop. i pererab. M.: «MISiS». 2002. 360 s.
15. Chabina E.B., Alekseev A.A., Filonova E.V., Lukina E.A. Primenenie metodov analiticheskoj mikroskopii i rentgenostrukturnogo analiza dlja issledovanija strukturno-fazovogo sostojanija materialov [Application of methods of analytical microscopy and X-ray analysis for the study of structural phase state materials] //Trudy VIAM. 2013. №5. St. 06 (viam-works.ru).
16. Moiseev V.N., Kulikov F.R., Kirillov Ju.G., Sholohova L.V., Vas'kin Ju.V. Svurnye soedinenija titanovyh splavov [Welds titanium alloys]. M.: Metallurgija. 1979. 248 s.
17. Horev M.A., Ioda A.V., Krasnozhon A.I. Mehanicheskie svojstva i struktura svarnyh soedinenij iz titanovogo splava VT23, vypolnennyh jelektronno-luchevoj svarkoj [The mechanical properties of welded joints and structure of the titanium alloy VT23 performed by electron beam welding] //Svarochnoe proizvodstvo. 1981. №7. S. 25–26.
18. Il'in A.A., Skvorcova S.V., Popova Ju.A., Kudelina I.M. Vlijanie termicheskoj obrabotki na formirovanie struktury i svojstv krupnogabaritnyh polufabrikatov iz splava VT23 [Effect of heat treatment on the structure and properties of the large semi-finished alloy VT23] //Titan. 2010. №4. S. 48–53.
19. Skvorcova S.V., Popova Ju.A., Panin P.V., Grushin I.A., Kuryshev E.A. Vlijanie termicheskoj obrabotki na strukturu i svojstva svarnyh soedinenij iz titanovogo splava VT23 [Effect of heat treatment on the structure and properties of welded joints made of titanium alloy VT23] //Titan. 2011. №2. S. 16–21.
20. Skvorcova S.V., Mamonov A.M., Panin P.V., Grushin I.A., Petrov A.A. Vlijanie termicheskoj obrabotki na formirovanie struktury i kompleksa mehanicheskikh svojstv krupnogabaritnyh polufabrikatov iz titanovogo splava VT23 [Effect of heat treatment on the structure and mechanical properties of large complex of semi-finished titanium

alloy VT23] /V sb. tezisov dokl. sed'mogo Mezhdunarodnogo ajerokosmicheskogo kongressa IAC'12. 2012. S. 193–194.

21. Panin P.V., Dzunovich D.A., Kudelina I.M., Grushin I.A. Termicheskaja obrabotka krupnogabaritnyh polufabrikatov vysokoprochnogo titanovogo splava VT23 [Heat treatment of large semis high strength titanium alloy VT23] /V sb. materialov Vserossijskoj nauch.-tehnich. konf. «NMT–2012». 2012. S. 80–81.
22. Grushin I.A., Krylov S.A., Popova Ju.A. Izuchenie makronaprjazhenij v svarnyh soedinenijah titanovogo splava VT23 [Study macrostresses in welded titanium alloy VT23] /V sb. tezisov dokladov MMNK «XXXVII Gagarinskie chtenija». T.1. 2011. S. 129–131.
23. Grushin I.A., Mamontova N.A., Kuryshev E.A. Termicheskaja obrabotka svarnyh soedinenij krupnogabaritnyh polufabrikatov titanovogo splava VT23, poluchennyh jelektronno-luchevoj svarkoj [Heat treatment of welded joints of large semi-finished titanium alloy VT23 produced by electron beam welding] /V sb. tezisov dokladov MMNK «XXXVIII Gagarinskie chtenija». T.1. 2012. S. 28–29.