

РОЗДІЛ III. ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ

УДК 621.791

*Татьяна Таранова, Эдуард Вржижевский, Татьяна Соломийчук, Евгений Половецкий,
Олег Новомлинец*

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЖАРОПРОЧНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА, ВЫПОЛНЕННОГО ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКОЙ

*Тетяна Таранова, Едуард Вржижевський, Тетяна Соломійчук, Євген Половецький,
Олег Новомлинець*

ВПЛИВ РЕЖИМІВ ТЕРМІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ НА СТРУКТУРУ І ВЛАСТИВОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ЖАРОМІЦНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВУ, ВИКОНАНОГО ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВИМ ЗВАРЮВАННЯМ

*Tatiana Taranova, Eduard Vrzhezhevskii, Tatiana Solomiichuk, Evgenii Polovetskii,
Oleg Novomlinets*

THE INFLUENCE OF THE MODES OF HEAT TREATMENT ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF THE WELDED CONNECTIONS OF THE HEAT-RESISTANT TITANIUM ALLOY CARRIED OUT USING THE ELECTRON-BEAM WELDING

Показаны результаты применения локальной лучевой термообработки жаропрочных титановых сплавов с интерметаллидным упрочнением для предупреждения образования трещин и обеспечение технологической прочности сварных соединений указанных сплавов. Исследовано влияние локальной термообработки на свойства и структуру сварных соединений, выполненных электронно-лучевой сваркой. Применение печной термообработки позволяет повысить пластические свойства и получить однородную структуру сварного соединения.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, локальная термообработка, сварное соединение, общая печная термообработка.

Рис.: 7. Табл.: 1. Библ.: 11.

Показано результати застосування локальної променевої термообробки жароміцних титанових сплавів з інтерметалічним зміцненням для попередження утворення тріщин і забезпечення технологічної міцності зварних з'єднань зазначених сплавів. Досліджено вплив локальної термообробки на властивості та структуру зварних з'єднань, виконаних електронно-променевим зварюванням. Застосування пічної термообробки дозволяє підвищити пластичні властивості й отримати однорідну структуру зварного з'єднання.

Ключові слова: електронно-променеве зварювання, локальна термообробка, зварене з'єднання, загальна пічна термообробка

Рис.: 7. Табл.: 1. Бібл.: 11.

The results of the application of the local beam heat treatment of the heat-resistant titanium alloys with the intermetallic strengthening to prevent the formation of cracks and ensuring the technological strength of the welded connections of mentioned alloys was presented. The influence of local heat treatment on the properties and structure of the welded connections made of electron - beam welding was investigated. The application of the stove heat treatment allows to improve the plastic properties and to obtain the homogeneous structure of the welded connection.

Key words: electron-beam welding, local heat treatment, welded connection, general stove heat treatment.

Fig.: 7. Tabl.: 1. Bibl.: 11.

Постановка проблеми. Повышение жаропрочности и ресурса деталей двигателей одна из важнейших проблем, для успешного решения которой необходимо обеспечение жаропрочности сплавов, улучшение их качества и усовершенствование технологии изготовления деталей.

Разработка жаропрочных титановых сплавов, как известно, обусловлена степенью легирования сплава алюминием, когда не проявляется склонность к термической нестабильности структуры, в результате образования упорядоченной α_2 -фазы (Ti_3Al). Дисперсионное упрочнение создания новых жаропрочных титановых сплавов (на основе Ti_3Al , $TiAl$) позволяет повысить их эксплуатационные характеристики, например, повысить рабочие температуры деталей двигателей на 100–150 °С. Однако такие сплавы

имеют ограниченную пластичность, что является основным их недостатком. Это затрудняет практическое использование сплавов в изделиях различного назначения [8].

Анализ последних исследований и публикаций. В настоящее время титановые сплавы являются основным конструкционным материалом в авиастроении. Уникальные свойства титановых сплавов определяют широкие возможности их применения для изготовления ответственных конструкций в самолетостроении, двигателестроении, химической и других областях промышленности. Большинство промышленных титановых сплавов основано на двухфазной ($\sigma+\beta$)-структуре, что обеспечивает возможность широкого варьирования механических свойств путем эффективной термической обработки. Реальная возможность применения изделий из этих сплавов, в том числе сварных и крупногабаритных, состоит в дальнейшем изучении возможностей термической обработки, где основой остается вопрос изучения характеристик структуры, механических и служебных характеристик.

Сварка – один из наиболее распространенных технологических процессов при создании сложных деталей и узлов, поэтому свариваемость титановых сплавов – важный фактор, определяющий целесообразность его применения [6; 7].

Замена механических соединений деталей больших сечений на сварные позволяет значительно снизить вес конструкций. В связи с этим широкие перспективы для применения открываются перед электронно-лучевой сваркой (ЭЛС), позволяющей соединять детали толщиной до 100 мм и более.

При использовании ЭЛС металл сварного соединения отличается значительным градиентом температур. На участке длиной всего в несколько миллиметров происходят значительные изменения в структуре от литой к перегретой в β -области и равновесной мелкозернистой структуре основного металла [6]. Одной из характерных особенностей сплавов на основе титана является их низкая теплопроводность, что обуславливает большие градиенты температур и напряжений в области сварного соединения [1]. Применение локальной термической обработки (ЛТО) электронным лучом в вакууме является весьма эффективной и экономически оправданной операцией. При использовании ЛТО снижается уровень сварных напряжений, улучшается структура и свойства сварных соединений, снижается вероятность образования трещин.

Выделение не решенных ранее частей общей проблемы. Не достаточно исследовано использование локальной лучевой термообработки для сварных соединений жаропрочных титановых сплавов с повышенным комплексом механических свойств для обеспечения технологической прочности деталей компрессоров высокого давления, работающих при температурах до 600 °С.

Цель работы. Целью данной работы является исследование применения локальной термообработки и печного отжига для улучшения пластических свойств сварных соединений жаропрочного титанового сплава с повышенным содержанием алюминия, выполненных электронно-лучевой сваркой.

Выкладка основного материала. Для достижения поставленной задачи методом электронно-лучевой плавки был получен сплав следующего состава: Al-9 %; Sn-5 %; Nb-6 %; Zr-6,5 %; Mo-5,7 %; V-1 %; Si-0,2 % весовых процентов. Прокатка в требуемый размер выполнялась по стандартному режиму, применяемому для жаропрочных титановых сплавов. Слитки опытных титановых сплавов выплавлялись методом электронно-лучевой тигельной плавки с электромагнитным перемешиванием [11]. Этот метод позволяет получить однородный расплав и, после охлаждения, однородные по химическому составу слитки. Диаметр слитков составлял 70 мм, масса – 5–10 кг. Затем полученные слитки подвергались термомеханической обработке. Сплав деформировали путем осадки на гидравлическом прессе в контейнере. Обработка проводилась в три

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

цикла: 1 – нагрев до 1165 °С и осадка на 15–20 %; 2 – нагрев до 1165 °С и осадка на 10–15 %; 3 – нагрев до 1165 °С и осадка на 7–10 %.

Далее сплав был прокатан в пластину толщиной 9–11 мм на двухвалковом реверсивном стане. При достижении в печи заданной температуры заготовки выдерживались на протяжении одного часа и после этого подвергались деформированию. При прокатке для получения мелкодисперсной структуры обеспечивали 60–70 % деформацию в β -области (1050–1100 °С), а оставшиеся 30–40 % - в ($\alpha+\beta$) и α -областях (980–900 °С). После прокатки металл отжигали при температуре 800 °С.

При содержании алюминия в титане свыше 7 % твердый раствор распадается с выделением дисперсной α_2 -фазы, дополнительно упрочняющей титан [4]. Как известно, при сварке жаропрочных сплавов имеет место резкое снижение пластичности сварного соединения [2]. Анализ полученных результатов показал очень низкую пластичность сварных соединений жаропрочного титанового сплава с дисперсионным (силицидным, интерметаллидным) упрочнением. При наличии значительных после сварочных остаточных напряжений сварные соединения хрупко разрушались при минимальных дополнительных нагрузках.

Сварку проводили по следующему режиму: $U_{\text{уск}} = 60$ кВт, $I_{\text{луча}} = 80$ мА, $V = 7$ мм/с (рис. 1). После сварки в вакуумной камере осуществлялась локальная термическая обработка.



Рис. 1. Внешний вид образца со швом жаропрочного титанового сплава с повышенным содержанием алюминия, выполненного ЭЛС

Сварное соединение исследуемого титанового сплава нагревалось электронным лучом до 900 °С и выдерживалось в течение 10 минут. Затем проводилось охлаждение до комнатной температуры в вакуумной камере. Далее сварное соединение было подвергнуто изотермическому отжигу: температура отжига – 1000 °С, время – выдержка 1ч, охлаждение с печью до 600–650 °С, выдержка 5 ч, охлаждение на воздухе [2; 3; 5].

Визуальный анализ сварных соединений показал, что проводимая локальная термическая обработка предотвращает образование трещин, которые являются характерными для сварных соединений жаропрочных титановых сплавов. Структура металла шва и переходной зоны по сравнению с основным металлом имеет свою специфику (рис. 2, а, з). После электронно-лучевой сварки сварное соединение жаропрочного титанового сплава резко закаленного с температуры β -области представляет собой сложнелегированную структуру.

Внешний вид металла шва сварного соединения исследуемого жаропрочного титанового сплава с повышенным содержанием алюминия, выполненного ЭЛС, представлено на рис. 2, а, з. Локальность и интенсивность процесса сварки ЭЛС обеспечивают образования глубокого узкого шва, размер которого составляет 3–3,5 мм, ширина зоны термического влияния – 1 мм. Швы имеют в обоих случаях четко выраженную цилиндрическую форму. Характерной особенностью макроструктуры сварного соединения без ТО является «наследственная» полосчатость в зоне термического влияния, продолжающая полосы структурной неоднородности основного металла (рис. 2, а).

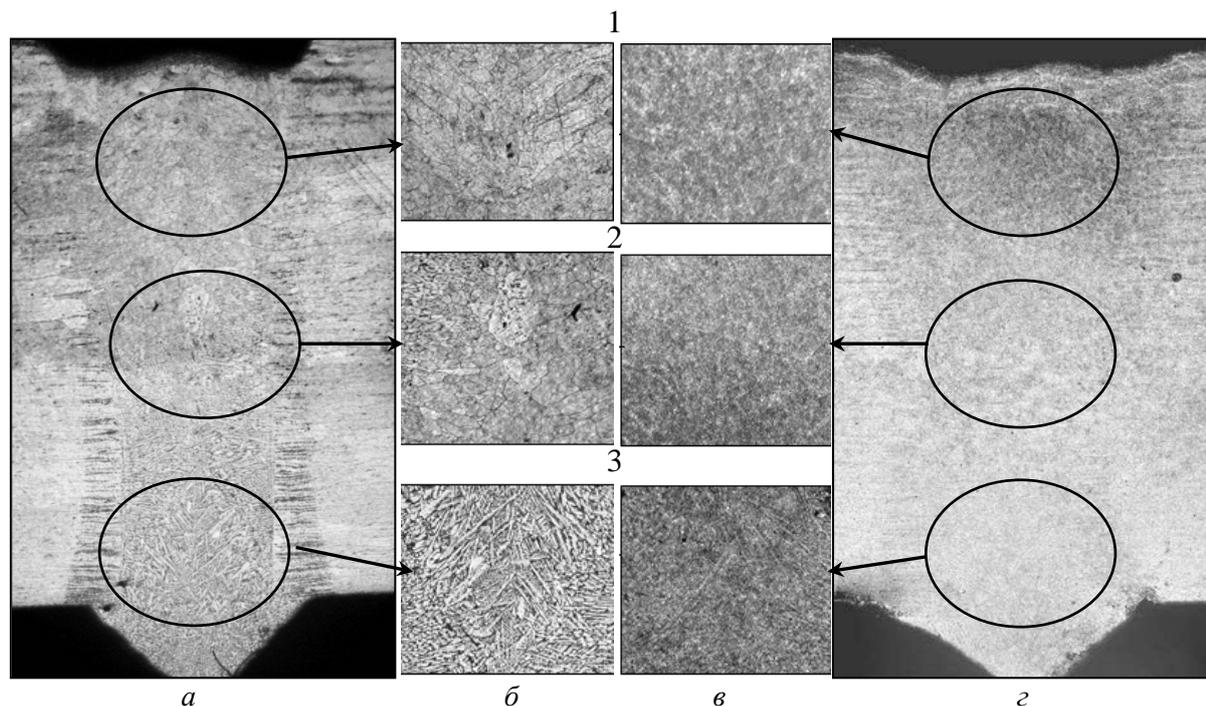


Рис. 2. Микроструктуры сварного соединения (а, г – $\times 25$; б, в – $\times 500$) исследуемого жаропрочного титанового сплава с повышенным содержанием алюминия, выполненного ЭЛС: а, б – без ТО, в, г – после печной ТО; 1 – верхний участок шва; 2 – центральный участок шва; 3 – корень шва

Исследования особенностей структуры проводили в трех участках шва: верхней области, средней части и в корне. В целом макроструктура образца в состоянии после сварки имеет традиционное кристаллическое строение. Столбчатые кристаллиты растут навстречу друг другу относительно оси шва. В разных участках шва образуются структуры различного типа. Так, в верхнем участке шва кристаллиты растут по линии сплавления навстречу друг другу и соединяются под большими углами (рис. 2, б). В центральной части шва кристаллиты направлены преимущественно вдоль оси шва. Они имеют различную форму и размеры. Структура корня шва состоит из характерных столбчатых кристаллитов с тонкой субструктурой произвольной ориентации (рис. 2, б (3)).

Отмечаемые структурные изменения и неоднородность литого металла в различных участках шва связаны с особенностями процесса ЭЛС – локальностью и высокой интенсивностью термического цикла сварки.

Анализ структуры сварных соединений показал, что выполнение печной термообработки по режиму, приведенному выше, повышает ее однородность по всей толщине соединения. В структуре ЗТВ также отмечается большая степень однородности: линия сплавления еле заметна, а наследственная полосчатость исчезла. Очень трудно выявить саму зону термического влияния.

Измерение твердости образцов проводили в различных участках и уровнях по высоте сварного соединения (рис. 3). Результаты анализа твердости показали, что в образце без ТО во всех зонах сварного соединения наблюдается скачкообразное изменение твердости (рис. 3, а). Твердость металла шва составляет 3200–3700 МПа. Снижение твердости на 10 % наблюдается в ЗТВ (3150–3450 МПа) и незначительное в основного металла (3300–3500 МПа). Такое изменение твердости связано с тем, что фазовое состояние металла шва после сварки термодинамически менее устойчивое, чем в других зонах сварного соединения.

Выполнение локальной ТО и печного отжига приводит к менее выраженному скачкообразному изменению твердости металла шва. При этом следует отметить, что твер-

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

дость металла шва незначительно выше по сравнению с твердостью основного металла (рис. 3, б). Это указывает на положительное влиянием процесса термической обработки, приводящей к незначительному упрочнению, при котором достигается формирование однородной структуры сварного соединения.

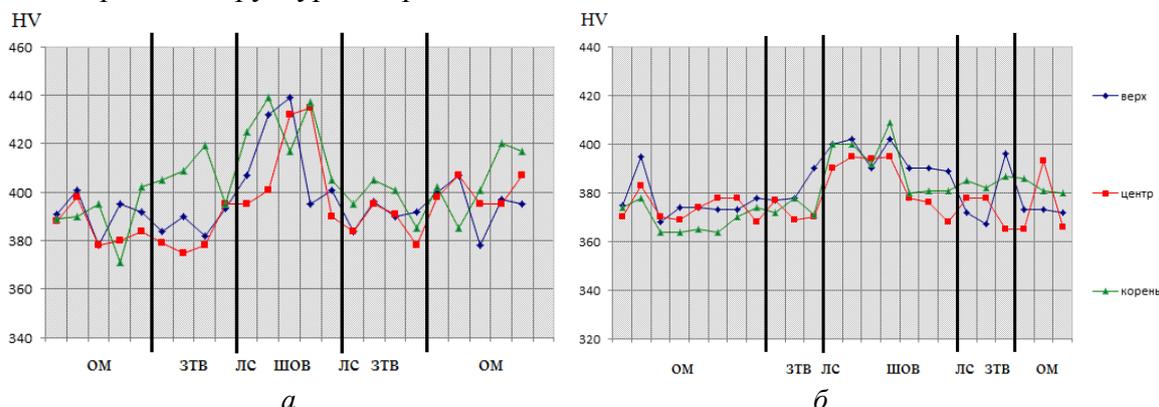


Рис. 3. Характер изменения микротвердости сварного соединения жаропрочного титанового сплава с повышенным содержанием алюминия: а – без ТО; б – после ТО

Металлографические исследования сварных соединений жаропрочного титанового сплава с повышенным содержанием алюминия, выполненных ЭЛС. Проведенные микроструктурные исследования показали, что в зоне сварного соединения отсутствуют видимые дефекты в виде несплошностей, непроваров, пор.

Как упоминалось в работе [4], повышение технологической пластичности сплавов титана с повышенным содержанием алюминия происходит за счет увеличения в структуре β-фазы. Увеличение в структуре β-фазы приводит к существенному снижению усилий деформации при прокатке.

Основной металл (рис. 4, а) представляет собой деформированную структуру проката, которая состоит из α-матрицы и мелкодисперсных частиц β-фаз [10]. На рис. 4, б представлена микроструктура участка крупного зерна ЗТВ. Структура состоит из светлой матрицы α-фазы и скоагулированных выделений β-фазы, вытянутых по направлению проката. В металле шва наблюдается двухфазная структура с ярко выраженным дендритным строением (рис. 4, в). В микроструктуре обнаружена α'-фаза в виде рельефной матрицы и глобулярные выделения β-фазы по границам литых кристаллитов.

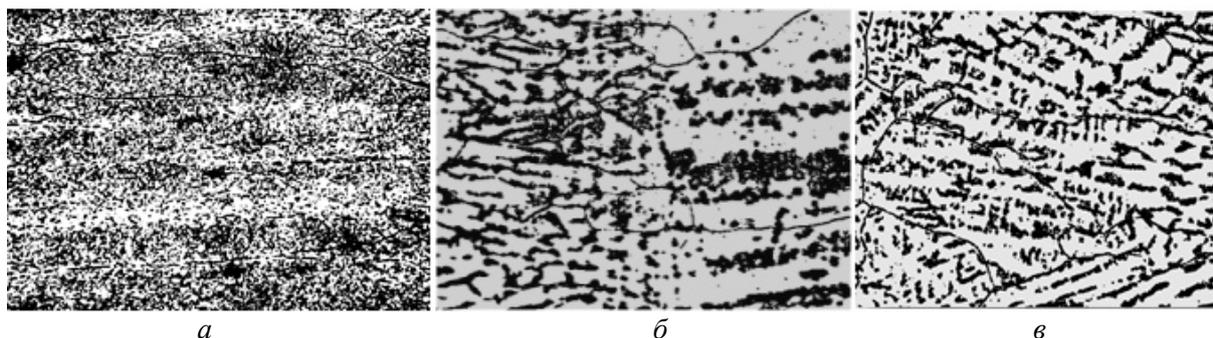


Рис. 4. Микроструктура исследуемого жаропрочного титанового сплава с повышенным содержанием алюминия, выполненного ЭЛС без ТО: а – шов; б – ЗТВ; в – основной металл (×500)

Микроструктура сварного соединения исследуемого жаропрочного титанового сплава, выполненного ЭЛС, после печной ТО, представлена на рис. 5. Наблюдаются значительные структурные изменения в образце после локальной ТО по сравнению со структурой образца без ТО. После ТО микроструктура во всех участках сварного соединения имеет структуру (α+β)-твердых растворов и отличается формой и соотношением выделений α- и β-фаз.

В отличие от сварных соединений микроструктура основного металла (рис. 5, а) состоит из более крупных, хаотично расположенных пластин α -фазы. Количество выделений β -фазы значительно меньше по сравнению с участком ЗТВ, однако отмечается укрупнение скоагулированных выделений β -фазы.

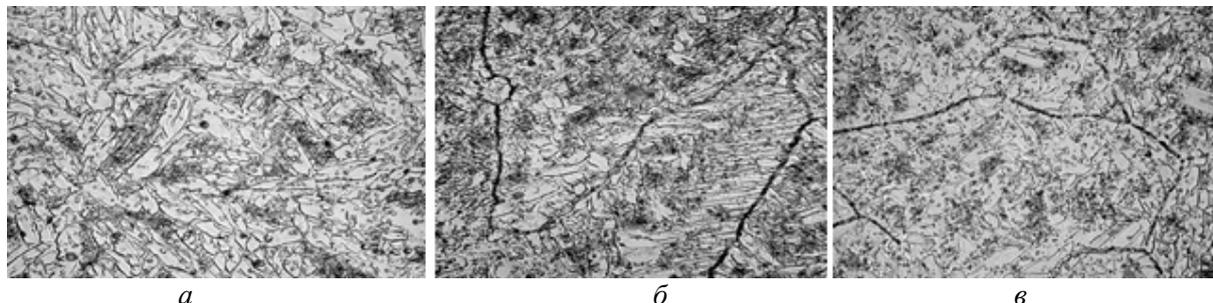


Рис. 5. Микроструктура сварного соединения исследуемого жаропрочного титанового сплава с повышенным содержанием алюминия, выполненного ЭЛС, после печной ТО: а – основной металл; б – ЗТВ; в – шов ($\times 1000$)

В микроструктуре ЗТВ (рис. 5, б) наряду с хаотически расположенными пластинами α -фазы образовались участки α -пластин, ориентированных в определенном направлении. Аналогично структуре металла шва границы зерен также прерывисты и декорированы мелкодисперсными выделениями интерметаллидов.

После печной ТО микроструктура шва (рис. 5, в) состоит из хаотически расположенных пластин α -фазы и скоагулированных выделений β -фазы. Границы зерен прерывистые и декорированы мелкодисперсными выделениями, по-видимому, интерметаллидами. В микроструктуре ЗТВ (рис. 4, б) наряду с хаотически расположенными пластинами α -фазы наблюдаются участки α -пластин, ориентированна в определенном направлении. Границы зерен также прерывисты и декорированы мелкодисперсными выделениями интерметаллидов. Количество выделений значительно больше. Они характеризуются более высокой дисперсностью и сравнительно равномерно распределены по объему, чем в других участках сварного соединения.

Методом рентгеноструктурного анализа на приборе ДРОН-УМ1 в монохроматическом излучении $\text{CuK}\alpha$ установлено, что в сварном соединении без печной термообработки содержание α -Ti составляет 55,5 %, β -Ti – равно 25,4 % и Ti_3Al – 19,1 %. В сварном соединении с печной термообработкой α -Ti – 53,96 %, а β -Ti – 46,04 % соответственно. Выполненная печная термообработка обеспечивает увеличение количества β -фазы почти в 2 раза, что придает большую пластичность сварному соединению.

Механические свойства жаропрочного титанового сплава с повышенным содержанием алюминия и сварного соединения, выполненного ЭЛС с ЛТО и после общей печной обработки. В табл. представлены механические свойства жаропрочного титанового сплава с повышенным содержанием алюминия и сварного соединения, выполненного ЭЛС с ЛТО и после общей печной ТО обработки.

Таблица

Механические свойства сварных соединений и основного металла

Характеристика образца	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ , %	Ψ , %	Ударная вязкость, Дж/см ²
Основной металл	–	1003,9	–	–	4,0
Основной металл после общей печной термообработки	870,4	1002,3	1,7	3,4	3,9
Сварное соединение после ЛТО	–	794,3	–	–	–
Сварное соединение после ЛТО и общей печной термообработки	877,6	1005,2	1,3	2,7	3,5

Анализируя механические свойства жаропрочного титанового сплава с повышенным содержанием алюминия, следует отметить, что основной металл сплава обладает высокой прочностью и низкой ударной вязкостью. После проведения печной обработки повышаются пластические свойства основного металла. Как видно из табл., механические показатели образцов после ЭЛС сварки обладают низкими свойствами. Только в образцах сварного по всем показателям механических свойств (предела прочности, текучести, относительного удлинения, сужения и ударной вязкости) прочность основного металла и сварного соединения, выполненного ЭЛС после печной термообработки, обладают высокими показателями и находятся на одном уровне. Данные сплавы обладают невысокой технологической пластичностью. Полученные результаты свидетельствует о том, что сварные соединения титанового сплава с повышенным содержанием алюминия без термообработки нельзя использовать в промышленности.

Сопоставление структуры и механических свойств после общей печной термообработки показывает, что основными факторами, влияющими на свойства, являются соотношения количества α и β -фаз, их форма и дисперсность.

Таким образом, результаты исследований показали, что проведение печной термообработки сварного соединения улучшает свойства, способствует повышению прочности, пластичности, предотвращает образование горячих трещин и дает возможность сохранять сварные конструкции длительное время без опасности образования эксплуатационных трещин.

Фрактографические исследования сварных соединений жаропрочного титанового сплава с повышенным содержанием алюминия, выполненных ЭЛС. На рис. 6, *a* представлена поверхность разрушения ударного образца основного металла исследуемого жаропрочного титанового сплава с повышенным содержанием алюминия. Фронт магистральной трещины распространялся строго перпендикулярно приложенной нагрузке. Слабо развитый рельеф поверхности разрушения указывает на действие хрупкого транскристаллитного разрушения.

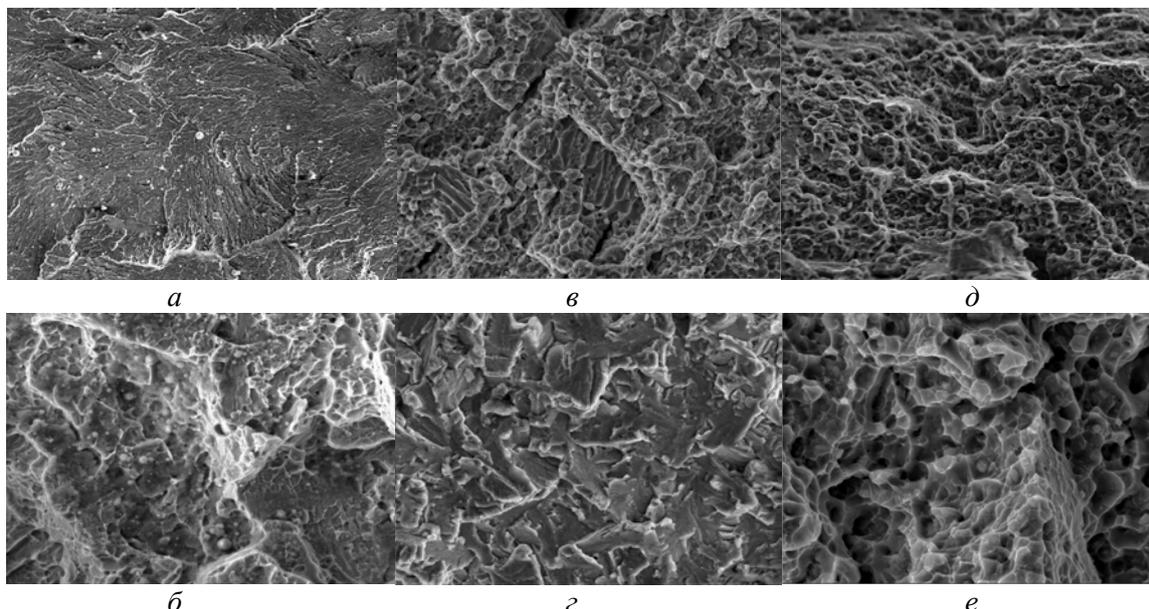


Рис. 6. Фрактографические исследования исследуемого жаропрочного титанового сплава с повышенным содержанием алюминия: *a, б* – основной металл; *в, г* – сварное соединение без ТО; *д, е* – сварное соединение после ТО; *a, в, д* – $\times 1000$; *б, г* – $\times 3700$; *е* – $\times 10000$

Механизм разрушения хрупкий (транскристаллитный) с четко различимыми ручьи-стыми узорами в той же общей плоскости скола (рис. 6, *a*). Почти на всех фасетках скола видны тонкие ручьи-стые узоры, которые ограничивают системы ручьев за счет

очень малых отклонений от общей кристаллографической плоскости роста магистральной трещины. На отдельных участках излома наблюдаются фрагменты вязкого разрушения (рис. 6, б). В вязких обнаружены выделения силицидов, когерентные с матрицей, что предположительно обеспечивает и пластичность сплава [9].

Рельеф поверхности разрушения сварного соединения без ТО представлен на (рис. 6, в, г). Разрушение произошло в основном путем скола и отрыва по пластинам α - и β -фаз, обнаружены короткие межзеренные трещины (рис. 6, в). На поверхности излома видны веерообразные перистые гребни внутризеренного скола (рис. 6, г).

Рельеф поверхности разрушения сварного соединения исследуемого жаропрочного титанового сплава с повышенным содержанием алюминия после печной ТО представлен на рис. 6 д, е. Характер разрушения поверхности сколом составляет 80 %, излома смешанного типа. На рис. 6, г представлен участок скола, полученный внутризеренным сколом через α - и β -фазы. На поверхности наблюдаются разрывы перпендикулярно плоскости скола, дробление пластин и выделения частиц. Помимо разрушения сколом наблюдаются вязкие участки (рис. 6, е), которые сформированы по ямочному механизму слияния пор, в которых наблюдаются упрочняющие частицы размером от 1,5 до 3 мкм (рис. 6, е).

Были проведены статические испытания на растяжение. Для статических испытаний использовали круглые образцы (диаметром 6 мм).

Поверхность разрушения основного металла исследуемого жаропрочного титанового сплава с повышенным содержанием алюминия после испытаний на растяжение имеет плоский излом со слабо развитым рельефом (рис. 7, а). Характер разрушения смешанный. При этом количество участков хрупкого разрушения значительно больше.

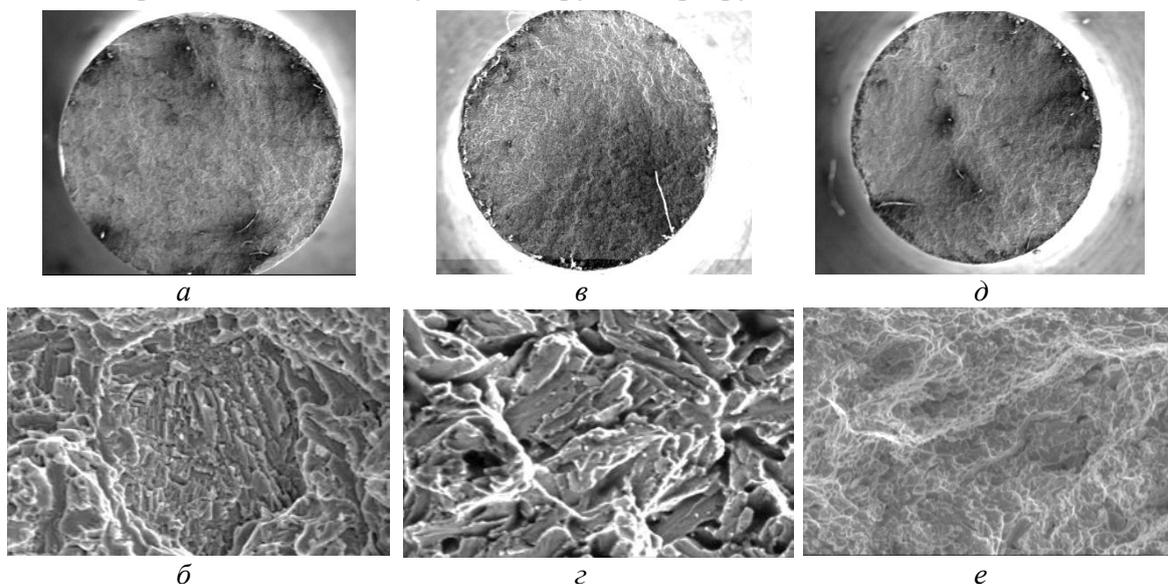


Рис. 7. Фрактографические исследования изломов исследуемого жаропрочного титанового сплава с повышенным содержанием алюминия после проведения испытаний на разрыв: основной металл а, б: а – внешний вид поверхности разрушения ($\times 15$); б – участок смешанного разрушения ($\times 1000$); в, г – сварное соединение без ТО: в – внешний вид поверхности разрушения ($\times 15$); г – участок межзеренного разрушения ($\times 1000$); в, г – сварное соединение после ЛТО: д – внешний вид поверхности разрушения ($\times 15$); е – участок вязкого разрушения ($\times 1000$)

На рис. 7, б представлен участок поверхности разрушения при большом увеличении. На некоторых участках (например, слева) – ямочное разрушение, в остальных областях – фасетки квазискола без каких-либо признаков ручьистых узоров.

Поверхность разрушения сварного соединения без термообработки исследуемого жаропрочного титанового сплава с повышенным содержанием алюминия также имеет слабо развитый рельеф (рис. 7, в). Характер разрушения хрупкий. На рис. 7, г представ-

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

лен участок поверхности разрушения при большом увеличении. Механизм разрушения интеркристаллитный (по границам зерен). Большая часть поверхности состоит из небольших фасеток.

Поверхность разрушения сварного соединения после печной термообработки исследуемого жаропрочного титанового сплава с повышенным содержанием алюминия также имеет развитый рельеф (рис. 7, д). Характер разрушения в основном вязкий (рис. 7, е). Во многих участках обнаружены гребни отрыва, а также ямки различных размеров, образованные по механизму слияния микропор, наличие которых свидетельствует о локальном развитии пластической деформации.

Выводы

1. Анализ полученных результатов показал, что в сварных соединениях исследуемого жаропрочного сплава на основе алюминид титана, выполненного ЭЛС, локальная термообработка обеспечивает технологическую прочность швов, при этом вязкость снижается.

2. Выполнение общей печной термообработки обеспечивает как прочностные, так и пластические свойства сварных конструкций. Механизм разрушения сварных соединений преимущественно вязкий.

Список использованных источников

1. *Влияние режимов электронно-лучевой сварки жаропрочных титановых сплавов на склонность к образованию холодных трещин* / Э. Л. Вржижевский, Е. А. Великоиваненко, Г. Ф. Розынка и др. // *Титан*. – 2013. – № 2. – С. 35–38.
2. *Вульф Б. К.* Термическая обработка титановых сплавов / Б. К. Вульф. – М. : Металлургия, 1969. – 376 с.
3. *Грабин В. Ф.* Основы металловедения и термической обработки сварных соединений из титановых сплавов / В. Ф. Грабин. – К. : Наук. думка, 1975. – 262 с.
4. *Использование водородных технологий при производстве деформированных полуфабрикатов из сплава на основе алюминид титана с повышенным комплексом механических свойств* / А. М. Мамонов, С. В. Скворцова, В. С. Спектор и др. // *Титан*. – 2013. – № 2. – С. 13–17.
5. *Лившиц Л. С.* Металловедение сварки и термическая обработка сварных соединений / Л. С. Лившиц, А. Н. Хакимов. – М. : Машиностроение, 1989. – 336 с.
6. *Свариваемые сплавы системы* / В. И. Замков, В. Ф. Топольский, И. К. Петриченко и др. // *Автоматическая сварка*. – 1998. – № 3. – С. 23–27.
7. *Свойства соединений высокопрочного титанового сплава Т110, выполненных сваркой плавлением* / С. В. Ахонин, В. Ю. Белоус, С. Л. Антонюк, И. К. Петриченко и др. // *Автоматическая сварка*. – 2014. – № 1. – С. 54–57.
8. *Солонина О. П.* Жаропрочные титановые сплавы / О. П. Солонина, С. Е. Глазунов. – М. : Металлургия, 1976. – 449 с.
9. *Фрактография* и атлас фрактограмм : справочник : пер. с англ. – М. : Металлургия, 1982. – 480 с.
10. *Хорев М. А.* Упрочнение сварных соединений титановых сплавов, полученных электронно-лучевой сваркой / М. А. Хорев // *МиТОМ*. – 1985. – № 1. – С. 52–54.
11. *Электронно-лучевая плавка в литейном производстве* / под ред. С. В. Ладохина. – К. : Сталь, 2007. – 626 с.

References

1. Vrzhezhevskii, L., Velikoivanenko, E. A., Rozynka, G. F. et al. (2013). Vliianie rezhimov elektronno-luchevoi svarki zharoprochnykh titanovykh splavov na sklonnost k obrazovaniuu kholodnykh treshchin [Influence of electron-beam welding modes for heat-resistant titanium alloys on cold cracking susceptibility]. *Titan*, Moscow: Titan, no 2, pp. 35–38 (in Russian).
2. Vulf, B. K. (1969). *Termicheskaiia obrabotka titanovykh splavov* [The heat treatment of titanium alloys]. Moscow: Metallurgiiia, 376 p. (in Russian).
3. Grabin, V. F. (1975). *Osnovy metallovedeniia i termicheskoi obrabotki svarnykh soedinenii iz titanovykh splavov* [Fundamentals of metallurgy and heat treatment of welded joints made of titanium alloys]. Kyiv: Naukova dumka, 262 p. (in Ukrainian).
4. Mamonov, A. M., Skvortcova, S. V., Spektor, V. S. et al. (2013). Ispolzovanie vodorodnykh tekhnologii pri proizvodstve deformirovannykh polufabrikatov iz splava na osnove aliuminida titana s povyshennym kompleksom mekhanicheskikh svoistv [Application of hydrogen technologies for manufacturing deformed semi-finished products from titanium aluminide-based alloy with advanced complex of mechanical properties]. *Titan*, Moscow: Titan, no 2, pp.13-17 (in Russian).
5. Livshic, L. S., Khakimov, A. N. (1989). *Metallovedenie svarki i termicheskaiia obrabotka svarnykh oedinenii* [Metallurgy of welding and heat treatment of welded joints]. Moscow: Mashinostroenie, p. 336 (in Russian).
6. Zamkov, V. I., Topolskii, V. F., Petrichenko, I. K. et al. (1998). *Svarivaemye splavy sistemy* [Welding alloys system]. *Avtomaticheskaiia svarka - Automatic welding*, no. 3, pp. 23–27 (in Russian).
7. Akhonin, S. V., Belous, V. Iu., Antoniuk, S. L., Petrichenko, I. K. et al. (2014). *Svoistva soedinenii vysokoprochnogo titanovogo splava T110, vypolnennykh svarkoi plavleniem* [The properties of high strength titanium alloy T110 compounds made by fusion welding]. *Avtomaticheskaiia svarka - Automatic welding*, no. 1, pp. 54–57 (in Russian).

8. Solonina, O. P., Glazunov, S. E. (1976). Zharoprochnye titanovye splavy [Heat-resistant titanium alloys]. Moscow: Metallurgiya, 449 p. (in Russian).
9. Fraktografiia i atlas fraktogramm [Fractography and atlas of fractographs]. Moscow: Metallurgiya, 1982, 480 p. (in Russian).
10. Khorev, M. A. (1985). *Uprochnenie svarykh soedinenii titanovykh splavov, poluchennykh elektronno-luchevoi svarkoi* [Strengthening welds titanium alloys produced by electron beam welding]. MiTOM, no. 1, pp. 52–54 (in Russian).
- Ladokhin, S. V. (ed.) (2007). *Elektronno-luchevaia plavka v liteinom proizvodstve* [Electron-beam melting in foundry]. Kyiv: Stal, 626 p. (in Ukrainian).

Таранова Татьяна Глебовна – кандидат технических наук, научный сотрудник ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ (ул. Боженко, 11, г. Киев, 03680, Украина).

Таранова Тетяна Глібівна – кандидат технічних наук, науковий співробітник ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ (вул. Боженка, 11, м. Київ, 03680, Україна).

Taranova Tatiana – PhD in Technical Sciences, Research Engineer of the E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Science of Ukraine (11 Bozhenko Str., 03680 Kiev, Ukraine).

E-mail: office22@ukr.net

Вржижевський Едуард Леонович – ведущий инженер ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ (ул. Боженко, 11, г. Киев, 03680, Украина).

Вржижевський Едуард Леонович – провідний інженер ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ (вул. Боженка, 11, м. Київ, 03680, Україна).

Vrzhizhevskii Eduard – Advanced Engineer of the E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Science of Ukraine (11 Bozhenko Str., 03680 Kiev, Ukraine).

E-mail: office22@ukr.net

Соломійчук Татьяна Григорьевна – научный сотрудник ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ (ул. Боженко, 11, г. Киев, 03680, Украина).

Соломійчук Тетяна Григорівна – науковий співробітник ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ (вул. Боженка, 11, м. Київ, 03680, Україна).

Solomiihchuk Tatyana – Research Engineer of the National Academy of Science of Ukraine (11 Bozhenko Str., 03680 Kiev, Ukraine).

E-mail: office22@ukr.net

Половецкий Евгений Викторович – кандидат технических наук, научный сотрудник ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ (ул. Боженко, 11, г. Киев, 03680, Украина).

Половецкий Євген Вікторович – кандидат технічних наук, науковий співробітник ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ (вул. Боженка, 11, м. Київ, 03680, Україна).

Polovetskii Evgenii – PhD in Technical Sciences, Research Engineer of the E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Science of Ukraine (11 Bozhenko Str., 03680 Kiev, Ukraine).

E-mail: evgesha2004@ukr.net

Новомлинец Олег Александрович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры сварочного производства и автоматизированного проектирования строительных конструкций, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14027, Украина).

Новомлинець Олег Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри зварювального виробництва та автоматизованого проектування будівельних конструкцій, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).

Novomlincets Oleg – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Welding and Automated Engineering Design of Building Constructions, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenko Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: oon1@ukr.net