

УДК 621.791.09:621.785

## РОЛЬ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ В ИЗМЕНЕНИИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СЛОЖНОЛЕГИРОВАННЫХ СПЛАВОВ

МАРКАШОВА Л.И.<sup>1</sup>, *д.т.н., проф.*,  
ПОКЛЯЦКИЙ А.Г.<sup>1</sup>, *к.т.н.*,  
КУШНАРЕВА О.С.<sup>2\*</sup>, *к. т. н.*

<sup>1</sup> Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, ул. Боженко, 11, МСП, Киев, 03680, Украина, тел. (044)2052161

<sup>2\*</sup> Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, ул. Боженко, 11, МСП, Киев, 03680, Украина, тел. (044)2052563, e-mail: olgakus@meta.ua

**Аннотация.** *Цель.* На примере анализа структурно-фазовых изменений сварных соединений сложнолегированных алюминий-литиевых и жаропрочных титановых сплавов показана актуальность комплексной экспериментально-аналитической оценки взаимосвязи структуры и свойств сварных соединений с целью оптимизации режимов их сварки. *Методика.* Объекты исследования в представленной работе: сварные соединения сложнолегированных Al-Li сплавов 1460, выполненные как аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом при использовании присадок Sv1201 и Sv1201+0,5%Sc, так и сваркой трением с перемешиванием без присадки, а также сварные соединения (электронно-лучевая сварка) опытных жаропрочных многокомпонентных титановых сплавов, относящихся к псевдо- $\alpha$  и  $\alpha+\beta$  титановым сплавам. Экспериментальная информация о структурно-фазовом состоянии металла сварных соединений получена методами световой, аналитической растровой, а также микродифракционной просвечивающей электронной микроскопии. *Результаты.* С учетом структурно-фазового состояния (химического состава, распределения и размеров фаз, зеренной, субзеренной и дислокационной структуры), формирующихся в сварных соединениях при различных исследуемых условиях сварки и внешних нагрузений выполнены оценки конкретного вклада определенного типа структур в изменение основных эксплуатационных свойств (прочности, пластичности, трещиностойкости) соединений, а также установлено влияние исследуемого структурного состояния на характер распределения, уровень нарастающих внутренних напряжений и механизмы их релаксации. *Научная новизна.* Представленные в работе экспериментально-аналитические оценки могут быть квалифицированы как решение важной научно-технической задачи в области материаловедения, которая заключается в обеспечении надежного качества сварных соединений. *Практическая значимость.* Предложенные аналитические оценки, которые позволяют выявить вклад отдельных структурных составляющих в показатели эксплуатационных свойств сварных соединений и прогнозировать повышение прочностных характеристик и трещиностойкости.

**Ключевые слова:** сварные соединения, алюминий-литиевые, титановые сплавы, легирование, термообработка, микроструктура, фазовые образования, субструктура, плотность дислокаций, эксплуатационные свойства

## РОЛЬ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СТАНУ В ЗМІНАХ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ СКЛАДНОЛЕГОВАНИХ СПЛАВІВ

МАРКАШОВА Л.І.<sup>1</sup>, *д.т.н., проф.*,  
ПОКЛЯЦЬКИЙ А.Г.<sup>1</sup>, *к.т.н.*,  
КУШНАРЬОВА О.С.<sup>2\*</sup>, *к. т. н.*

<sup>1</sup> Інститут електросварювання ім. Є.О. Патона НАН України, вул. Боженко, 11, МСП, Київ, 03680, Україна, тел. (044)2052161

<sup>2\*</sup> Інститут електросварювання ім. Є.О. Патона НАН України, вул. Боженко, 11, МСП, Київ, 03680, Україна, тел. (044)2052563, e-mail: olgakus@meta.ua

**Анотація.** *Мета.* На прикладі аналізу структурно-фазових змін зварних з'єднань складнолегованих алюмінієво-літєвих і жароміцних титанових сплавів показана актуальність комплексної експериментально-аналітичної оцінки взаємозв'язку структури і властивостей зварних з'єднань з метою оптимізації режимів їх зварювання. *Методика.* Об'єкти дослідження в представленій роботі: зварні з'єднання складнолегованих Al-Li сплавів 1460, виконані як аргонодуговим зварюванням неплавким електродом при використанні присадок Sv1201 і Sv1201 + 0,5% Sc, так і зварюванням тертям з перемішуванням без присадки, а також зварні з'єднання (електронно-променево зварювання) дослідних жароміцних багатоконпонентних титанових сплавів, що відносяться до псевдо- $\alpha$  і  $\alpha + \beta$  титанових

сплавів. Експериментальна інформація про структурно-фазовий стан металу зварних з'єднань отримана методами світлової, аналітичної растрової, а також мікродифракційної просвічувальної електронної мікроскопії. **Результати.** З урахуванням структурно-фазового стану (хімічного складу, розподілу і розмірів фаз, зерної, субзерної і дислокаційної структури), що формуються в зварних з'єднаннях при різних досліджуваних умовах зварювання і зовнішніх навантажень виконані оцінки конкретного внеску певного типу структур в зміну основних експлуатаційних властивостей (міцності, пластичності, тріщиностійкості) з'єднань, а також встановлено вплив досліджуваного структурного стану на характер розподілу, рівень наростаючих внутрішніх напружень та механізми їх релаксації. **Наукова значимість.** Представлені в роботі експериментально-аналітичні оцінки можуть бути кваліфіковані як вирішення важливої науково-технічної задачі в галузі матеріалознавства, яка полягає в забезпеченні надійної якості зварних з'єднань. **Практична значимість.** Запропоновані аналітичні оцінки, які дозволяють виявити внесок окремих структурних складових в показники експлуатаційних властивостей зварних з'єднань і прогнозувати підвищення міцності і тріщиностійкості.

**Ключові слова:** зварні з'єднання, алюмінієвий, титанові сплави, легування, термообробка, мікроструктура, фазові утворення, субструктура, щільність дислокацій, експлуатаційні властивості

## ROLE OF STRUCTURAL-PHASE CONDITION IN CHANGE OF SERVICE PROPERTIES OF WELDED JOINTS FROM COMPLEXLY ALLOYED ALLOYS

MARKASHOVA L.I.<sup>1</sup>, *Dr. of Tech. Sci., Prof.*,  
POKLAYTSKII A.G.<sup>1</sup>, *Cand. of Tech. Sci.*,  
KUSHNAREVA O.S.<sup>2\*</sup>, *Cand. of Tech. Sci.*

<sup>1</sup> Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, st. Bozhenko, 11, COM, Kiev, 03680, Ukraine, tel. (044)2052161

<sup>2\*</sup> Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, st. Bozhenko, 11, COM, Kiev, 03680, Ukraine, tel. (044)2052563, e-mail: olgakus@meta.ua

**Abstract. Aim.** Relevance of complex experimental-analytical estimation of relationship of structure and properties of welded joints for welding mode optimizing was shown by example of analysis of structural-phase changes of welded joints of complexly alloyed aluminum-lithium and heat-resistant titanium alloys. **Procedure.** The objects of examination in presented work were welded joint of complexly alloyed Al-Li alloys 1460, produced by non-consumable argon-arc welding using Sv1201 and Sv1201+0.5%Sc fillers as well as friction stir welding without filler, and welded joint (electron-beam welding) of pilot heat-resistant multi-component titanium alloys, which refer to pseudo -  $\alpha$  and  $\alpha + \beta$  titanium alloys. Experimental information on structure-phase condition of metal of welded joints was received by light, analytic scanning as well as micro-diffraction transmission electron microscopy. **Results.** Estimations of particular input of specific type of structures in change of main service properties (strength, ductility, crack resistance) joints were carried considering structural-phase condition (chemical composition, distribution and sizes of phase, grain, sub-grain and dislocation structures), forming in welded joint at different investigated welding conditions and external loading. Effect of examined structural condition on character of distribution, level of increasing internal stresses and mechanisms of their relaxation was also determined. **Scientific novelty.** Experimental-analytical estimations presented in the work can be qualified as solution of important scientific-technical task in area of materials science, which lies in providing of welded joint quality. **Practical importance.** Proposed are analytical estimations, which allow for determining input of separate structural constituents in the indices of service properties of welded joints and predicting increase of strength characteristics and crack-resistance.

**Keywords:** welded joints, aluminum, titanium alloys, alloying, heat treatment, microstructure, phase formations, substructure, dislocation density, service properties

### Введение

Для сварных соединений сложнолегированных сплавов, широко используемых в авиационной и аэрокосмической технике, судостроении, а также в химической промышленности, необходимо обеспечение в соответствующих конструкциях гарантированных механических свойств в различных эксплуатационных условиях, что в основном определяется

оптимальным структурно-фазовым состоянием, формирующимся, в процессе различных технологических операций (легирования, условий сварки, последующей термической обработки) [1–5].

### Цель

Целью данной работы являлось: выполнение оценок влияния конкретных структурно-фазовых составляющих металла зоны сварки на изменение наиболее значимых для

эксплуатационных условий механических характеристик сварных соединений (показателей прочности, пластичности и трещиностойкости), а также анализ влияния структурных и фазовых составляющих сварных соединений на протекание процессов накопления внутренних напряжений, возможности их пластической релаксации, что и является показателем трещиностойкости материала в эксплуатационных условиях.

### Методика

Сварные соединения сложнолегированных Al-Li сплавов 1460 (Al – 3 % Cu – 2 % Li – 0,08 % Sc), выполненные как аргодуговой сваркой неплавящимся электродом (АДСНЭ) при использовании присадок Sv1201 и Sv1201+0,5%Sc, так и сваркой трением с перемешиванием (СТП) без присадки, а также соединения (электронно-лучевая сварка – ЭЛС) жаропрочных многокомпонентных титановых сплавов, легированных Si, относящихся к псевдо –  $\alpha$  и  $\alpha+\beta$  исследовались на различных структурных уровнях.

При этом полная экспериментальная информация о структурно-фазовом состоянии металла сварных соединений была получена с помощью методов световой, аналитической растровой (SEM-515, фирмы «PHILIPS», Голландия), а также микродифракционной просвечивающей электронной микроскопии (JEM-200СХ, фирмы «JEOL», Япония) с ускоряющим напряжением 200кВ.

### Результаты

Исследованиями сварных соединений алюминиевых сплавов, отличающихся легированием, выполненных различными способами сварки установлено, что металл шва сварных соединений Al-Li сплава 1460 при использовании присадки Sv1201 (без скандия) после аргодуговой сварки (АДСНЭ), прежде всего, характеризуется: крупнозернистой структурой, формированием достаточно крупных глобулярных внутризеренных фазовых выделений ( $d$  до 3,5 мкм), протяженных массивных межзеренных эвтектик толщиной ( $h_{эвт}$ ) до 5 мкм, а также наличием вдоль границ зерен зон свободных от выделений (ЗСВ), с чем, как известно, связывают падение механических характеристик. Наблюдается некоторая неравномерность в распределении дислокаций в металле шва такого типа соединений, особенно вдоль протяженных приграничных ЗСВ, где плотность дислокаций ( $\rho$ ) уменьшается практически на порядок (до  $3 \times 10^8 \text{ см}^{-2}$ ) по сравнению с внутризеренной дислокационной плотностью, где  $\rho \sim 2 \dots 6 \times 10^9 \text{ см}^{-2}$ .

В условиях легирования металла шва скандием (до 0,5 %), который является модификатором структуры после сварки, наблюдаются некоторые, хотя и не столь значительные, изменения структуры металла зоны сварки по сравнению с соответствующими структурами в сварных соединениях без легирования скандием: измельчение зеренной структуры, зернограничных эвтектик, стадии диспергирования фазовых выделений в объемах зерен в сочетании с некоторым повышением плотности дислокаций (до  $4 \dots 9 \times 10^9 \text{ см}^{-2}$ ).

А наибольший эффект воздействия Sc на структуру наблюдается при использовании последующего (после сварки) отжига –  $T = 350 \text{ }^\circ\text{C}$ , 1 час, в условиях которого металл шва со скандием характеризуется не только существенным измельчением зеренной структуры (в 3 раза), но и формированием внутризеренной субструктуры при увеличении плотности дислокаций до  $8 \times 10^9 \dots 5 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$  в сочетании со значительным возрастанием объемной доли дисперсных внутризеренных фазовых выделений. Кроме того, скандий также способствует дроблению и соответственно – уменьшению количества и размеров зернограничных эвтектик (рис. 1 а, б), а также заполнению дисперсными фазами таких проблемных зон, как ЗСВ.

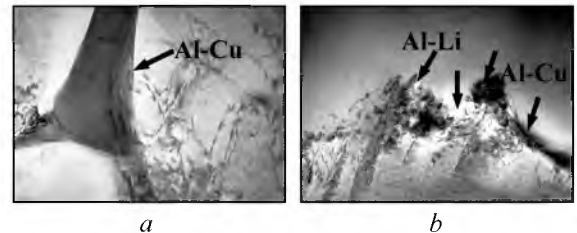
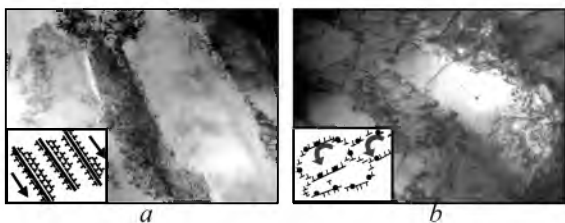


Рис. 1. Микроструктура зернограничных эвтектических образований металла шва сплава 1460 с присадочной проволокой Sv1201 (а) и Sv1201 + 0,5 % Sc (б) после термообработки ( $\times 30000$ ) / Microstructure of grain-boundary eutectic formations of weld metal from 1460 alloy with filler wire Sv1201 (a) and Sv1201 + 0.5 % Sc (b) after heat treatment ( $\times 30000$ )

Далее были проведены исследования структурно-фазовых изменений в металле сварных соединений (без Sc и со Sc) в сложных условиях динамического нагружения. Было установлено, что деформируемый металл шва без Sc в условиях внешнего динамического нагружения приобретает неустойчивое структурное состояние, о чем свидетельствует формирование мощных протяженных полос сдвига (ПС), рис. 2 а, для которых характерно неравномерное, резко градиентное распределение плотности дислокаций ( $\rho$ ) вдоль полос сдвига: от  $10^8 \dots 2 \times 10^9 \text{ см}^{-2}$  (внутри полос)

и до  $8 \times 10^{10} \dots 2 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$  (вдоль полосовых границ).

В случае легирования Sc в металле шва при аналогичных условиях динамического нагружения формируется более равномерное распределение дислокаций ( $8 \times 10^9 \dots 5 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$ ), а также диспергирование и фрагментация внутрислойной структуры, *рис. 2 б*. При этом наблюдается устойчивое блокирование возникающих в ПС фрагментов скандийсодержащими фазами. Формирование структур подобного типа способствует также увеличению возможностей пластической релаксации нарастающих внутренних напряжений в металле шва (особенно в экстремальных условиях) за счет подключения дополнительных – ротационных механизмов их пластической релаксации.



*Рис. 2. Тонкая структура отожженного металла шва сварного соединения сплава 1460, после динамического нагружения: а – шов без скандия; б – шов со скандием ( $\times 30000$ ) / Fine structure of annealed weld metal of joint from 1460 alloy after dynamic loading: а – weld without scandium; б – weld with scandium ( $\times 30000$ )*

С целью разработки других (кроме легирования) технологических подходов к формированию оптимального (с точки зрения эксплуатационных свойств) структурного состояния металла в зоне сварки алюминиевых сплавов, исследованы также особенности структурных изменений и при использовании других способов сварки алюминиевых сплавов, среди которых – сварка трением с перемешиванием (СТП). Показано, что структура металла шва уже непосредственно после сварки отличается весьма значительным измельчением зеренной и субзеренной структуры (что связано с активацией процессов зародышеобразования), повышением общей плотности дислокаций ( $\rho \sim 3 \dots 6 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$ ), при сравнительно равномерном их распределении, а также существенным диспергированием (в 2...5 раз) упрочняющих фаз и увеличении их количества во внутризеренных объемах зерен. Кроме того, также происходит дробление зернограницных эвтектик. Все это обеспечивается превалированием при СТП термомодеформационных условий при формировании структурно-фазового состояния металла шва.

Имея полный комплекс исследований на всех структурных уровнях, который дает информацию о всех структурных факторах и их параметрах, появляется возможность провести аналитические оценки конкретного вклада различных структур в исследуемой зоне в изменение наиболее значимых эксплуатационных свойств сварных соединений.

Аналитические оценки общего (интегрального) значения предела текучести ( $\Sigma\sigma_T$ ) выполняли, используя известную зависимость [6–11]:

$$\Sigma\sigma_T = \Delta\sigma_0 + \Delta\sigma_{T.P.} + \Delta\sigma_3 + \Delta\sigma_C + \Delta\sigma_D + \Delta\sigma_{D.U.}$$

включающую  $\Delta\sigma_0$  – сопротивление решетки металла движению свободных дислокаций (напряжение трения решетки или напряжение Пайерлса-Набарро);  $\Delta\sigma_{T.P.}$  – упрочнение твердого раствора легирующими элементами и примесями (твердорастворное упрочнение);  $\Delta\sigma_3$ ,  $\Delta\sigma_C$  – упрочнение за счет изменения величины зерна и субзерна (зависимости Холла-Петча – зернограницное и субзеренное упрочнение);  $\Delta\sigma_D$  – дислокационное упрочнение, обусловленное междислокационным взаимодействием;  $\Delta\sigma_{D.U.}$  – упрочнение за счет частиц фазовых образований по Оровану (дисперсионное упрочнение).

В результате выполненных оценок в исследуемых соединениях со Sc и без Sc после сварки и термообработки показано, что наиболее высокие показатели прочностных свойств характерны для условий со Sc (*рис. 3*). Наибольший вклад в  $\Sigma\sigma_T$  металла шва со Sc вносят  $\Delta\sigma_3$  (~ 29 %) и  $\Delta\sigma_{T.P.}$  (~ 25 %) упрочнение (*рис. 4*). А в случае без легирования Sc наибольший вклад в  $\Sigma\sigma_T$  обеспечивает в основном  $\Delta\sigma_{T.P.}$  (~ 28 %).

После термообработки ( $T = 350 \text{ }^\circ\text{C}$ , 1 час) в случае легирования металла шва Sc увеличиваются общие показатели прочностных характеристик, а максимальный вклад при этом вносят  $\Delta\sigma_{D.U.}$  (~ 32 %), а также  $\Delta\sigma_C$  (~ 30 %) упрочнения (*рис. 4*). В противоположность этому в случае отсутствия легирования Sc наибольший вклад вносит  $\Delta\sigma_C$ , что не превышает 20 % от интегрального показателя прочностных свойств такого типа соединений.

В условиях сварки СТП оценки  $\Sigma\sigma_T$  показали повышение этих значений на 40 % по сравнению с таковыми для условий сварки при АДСНЭ в состоянии без скандия (*рис. 3*), что обеспечивается в основном измельчением зеренной (до 27 %), субзеренной (до 21 %) структур и диспергированием ФВ (до 23 %) (*рис. 4*).

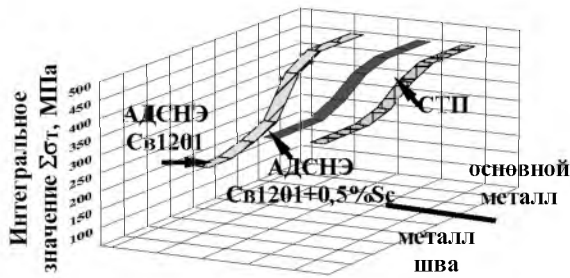


Рис. 3. Изменение  $\Sigma\sigma_T$  сварных соединений сплава 1460 при переходе от основного металла к металлу шва, полученных АДЧЭ с присадкой  $Sv1201$  и  $Sv1201 + 0,5\% Sc$  и CTII / Change of  $\Sigma\sigma_T$  of welded joints from 1460 alloy at transfer from base metal to weld metal, produced by non-consumable argon-arc welding with  $Sv1201$  and  $Sv1201 + 0.5\% Sc$  filler and FSW

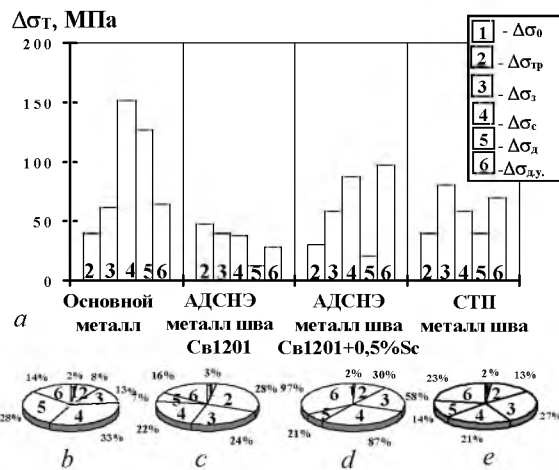


Рис. 4. Вклад (а) структурных составляющих ( $\Delta\sigma_T$ ) в расчетную величину  $\Sigma\sigma_T$ ; б-е – диаграммы, отражающие процентное соотношение структурного вклада в  $\Sigma\sigma_T$  в различных зонах исследования: в основном металле (б), в металлах шва после АДЧЭ с  $Sv1201$  (с),  $Sv1201 + 0,5\% Sc$  (д) и CTII (е) / Input (а) of structural constituents ( $\Delta\sigma_T$ ) in calculation value of yield strength; б-е – pie charts, reflecting percent relationship of structural input into  $\Sigma\sigma_T$  in different zones of examination: in base metal (б), in weld metal after non-consumable argon-arc welding with  $Sv1201$  (с) and  $Sv1201 + 0.5\% Sc$  (д) filler and FSW (е)

Комплексные структурные исследования в сочетании с аналитическими оценками позволили также прояснить характер влияния структурных факторов на процессы трещинообразования в зоне сварки исследуемых соединений, которые определяются величиной

локальных внутренних напряжений ( $\tau_{ЛВН}$ ). Исследования в этом плане позволяют определить структурные факторы, провоцирующие возрастание концентраторов  $\tau_{ЛВН}$  (т.е. условия зарождения и распространения трещин), либо выявить структурные факторы, блокирующие такие негативные процессы, какими являются трещинообразование [8, 12].

Так, в результате оценок установлено, что в металле шва без Sc формируются протяженные концентраторы  $\tau_{ЛВН}$  с уровнем до 1500 МПа (от 0,34 до 0,85  $\tau_{теор}$ ), которые и являются зонами зарождения и распространения трещин. И к таким зонам относятся границы ПС, рис. 5 а. Во внутренних объемах ПС значения  $\tau_{ЛВН}$  резко снижаются (на 2 порядка) до величины 5...15 МПа (0,0016...0,0055  $\tau_{теор}$ ), что в итоге создает резкий протяженный градиент  $\Delta\tau_{ЛВН}$  – зону зарождения и распространения трещин вдоль границ полос сдвига, рис. 5 а.

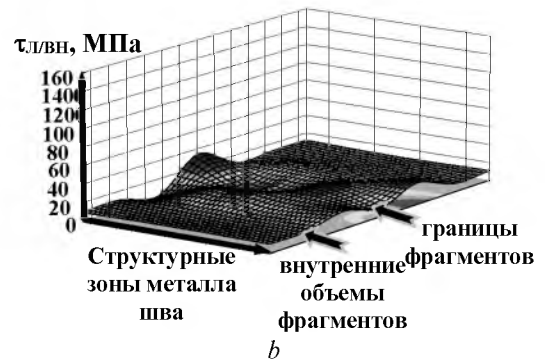
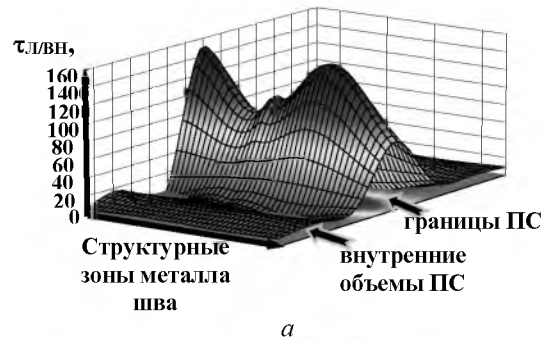
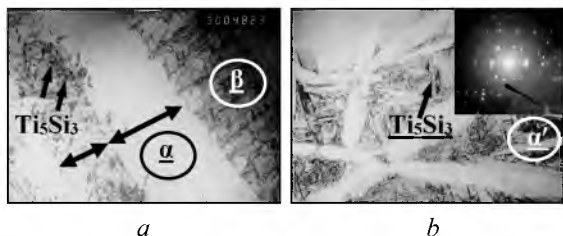


Рис. 5. Распределение  $\tau_{ЛВН}$  в металле шва (сварка + термообработкой) после внешнего динамического нагружения: а – без скандия; б – со скандием / Distribution of  $\tau$  in weld metal (welding with further heat-treatment) after external dynamic loading – without scandium; б – with scandium

В условиях термообработки после сварки в металле шва при легировании Sc наблюдается существенное снижение (практически в 4 раза) уровня  $\tau_{ЛВН}$  (до 58...360 МПа) при их равномерном распределении по всему объему металла шва, рис. 5 б, что и является основным

условием повышения трещиностойкости такого типа соединений.

Как видно из приведенных результатов, одной из наиболее значимых причин, способствующих трещинообразованию, является формирование протяженных полосовых структур. И это относится не только к алюминиевым сплавам, склонным к формированию мощных ПС – особенно под воздействием внешних нагрузжений. Аналогичную роль в процессах трещинообразования играют полосовые структуры и в металлах другого типа. Например, в титановых сплавах, легированных Si [13], где наличие полосовых структур зависит от типа формирующихся в металле соединений фазовых образований, отличающихся типом кристаллической решетки (ОЦК –  $\beta$  фаза; ГПУ –  $\alpha$  фаза, и мартенситная  $\alpha'$  – фаза соответственно – с максимальным и минимальным количеством систем скольжения), *рис. 6*.



*Рис. 6. Микроструктура фазовых составляющих ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\alpha'$ – фаза) в сварных соединениях титановых сплавов:  $\alpha+\beta$  сплав (a) и сплав с  $\alpha'$ -фазой (b) ( $\times 30000$ ) / Microstructure of phase constituents ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\alpha'$ – phase) in welded joints of titanium alloys:  $\alpha+\beta$  alloy (a) and alloy with  $\alpha'$ -phase (b) ( $\times 30000$ )*

Как следствие, именно в зависимости от формирующихся фаз в металле сварных соединений титановых сплавов и происходит резко градиентное распределение  $\Delta\rho$  и, соответственно, снижение их механических характеристик, в том числе и

трещиностойкости. Так, оценками показаны зоны формирования градиентов по  $\Sigma_{\sigma T}$  от 57 МПа (для  $\alpha$  – фаз с низкой  $\rho$ ) до 1010 МПа (для  $\beta$  пластин с высокой  $\rho$ ). Соответственно наблюдаются и изменения величины  $\tau_{ЛВН}$  в сварных соединениях в соответствующих фазовых составляющих ( $\tau_{ЛВН}$  изменятся от 10...100 МПа до 750...860 МПа при переходе от  $\alpha$  к  $\beta$  – фазам), что и является причиной трещинообразования. А в сварных соединениях, в зонах формирования  $\alpha'$  – фаз характеристики  $\Sigma_{\sigma T}$  (910...1040 МПа) и  $\tau_{ЛВН}$  (860...970 МПа) распределены более равномерно, что обеспечивает улучшение механических свойств и трещиностойкости.

### Научная новизна и практическая значимость

Представленные в работе экспериментально-аналитические оценки могут быть квалифицированы как решение важной научно-технической задачи в области материаловедения, которая заключается в обеспечении надежного качества сварных соединений.

Предложенные аналитические оценки, которые позволяют выявить вклад отдельных структурных составляющих в показатели эксплуатационных свойств сварных соединений и прогнозировать повышение прочностных характеристик и трещиностойкости.

### Выводы

Таким образом, для улучшения прочностных характеристик и трещиностойкости сварных соединений сложнелегированных сплавов необходимо стремиться к оптимизации структуры в зоне сварки при выборе сварочных режимов, термообработки, а также легирования, как присадочной проволоки, так и самого свариваемого материала.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Маркашова Л. И. Роль структуры в оптимизации свойств прочности, пластичности, трещиностойкости сварных соединений / Л. И. Маркашова, О. С. Кушнарева, Т. А. Алексеенко и др. // Строительство. материаловедение. Машиностроение. Сб. научн. тр. № 58, – Днепропетровск, ПГАСА, 2011. – С.677–683.

Markashova L. I. Role of structure optimization of properties of strength, ductility, fracture toughness of welded joints / L. I. Markashova, O. S. Kushnareva, T. A. Alekseenko et al. // Building, materials sciences, mechanic engineering: Collection of scientific papers

Issue №58 – Dnipropetrovsk, PSAES, 2011. – p. 677–683.

<http://pgasa.dp.ua/a/international%20conferences/starodubov/archive/referats%20of%20starodubov%202011-58.pdf>

2. Маркашова Л. И. Влияние способов сварки на структуру и механические свойства соединений алюминиевого сплава 1460 / Л. И. Маркашова, А. Г. Покляцкий, О. С. Кушнарева // Автоматическая сварка. – 2013. – № 3. – С. 20–25.

Markashova L. I., Poklaytskii A. G., Kushnareva O. S. Vliyanie sposobov svarci na strukturu i mekhanicheskie svoystva soedineniy alyuminiyevogo splava 1460 [Effect of welding methods on the structure and mechanical properties of 1460 alloy aluminum compounds] // Avtomaticheskaya svarka – Automatic Welding, 2013. – no 3, pp. 20–25.

<http://patonpublishinghouse.com/as/pdf/2013/as201303al1.pdf>

3. Фридлиндер И. Н. Алюминиевые сплавы в летательных аппаратах в периоды 1970 – 1999 гг. и 2000 – 2015 гг. / И. Н. Фридлиндер // Труды V сессии Научного совета по новым материалам МААН «Проблемы современного материаловедения». Киев: Наук. думка, 2000. – С. 15–19.

Fridlaynder I. N. Alyuminievye splavy v letatelnykh apparatekh v periody 1970 – 1999 gg. i 2000 – 2015 gg. [Aluminium alloys in aircraft during periods of 1970 – 1999 years and 2000 – 2015 years]. Trudy V sessii Nauchnogo soveta po novim materialam MAAN «Problemy sovremennoogo materialovedeniayu» [Proceedings of the V session of the Scientific Council on new materials IAAS «Problems of modern materials»]. Kiev: Science. Thought, 2000, pp. 15 – 19.

<http://viam.ru/public/files/2001/2001-203438.pdf>

4. Маркашова Л. И. Влияние скандийсодержащей проволоки на структуру и свойства соединений алюминий-литиевых сплавов, выполненных аргонодуговой сваркой / Л. И. Маркашова, О. С. Купнарева, И. И. Алексеенко // Автоматическая сварка. – 2014. – № 6 – 7. – С. 38–42.

Markashova L. I., Kushnareva O. S., Alekseenko I. I. Vliyanie scandiysoderghatchey provoloci na strukturu i svoystva soedineniy alyuminiy-litievyykh splavov, vpolnenyykh argonodugovoy svarkoy [Effect of scandium wire structure and properties of the compounds of aluminum-lithium alloys, TIG welding performed]. Avtomaticheskaya svarka – Automatic Welding, 2014. – no 6 – 7, pp. 38 – 42.

<http://patonpublishinghouse.com/rus/journals/as/2014/06/07>

5. Markashova L. I. Estimation of the strength and crack resistance of the metal of railway wheels after long-term operation / L. I. Markashova, V. D. Poznyakov, A. A. Gaivoronskii, E. N. Berdnikova, T. A. Alekseenko // Materials Science Volume 47, Issue 6 (2012) – Page 799–806.

<http://link.springer.com/article/10.1007/s11003-012-9458-1>

6. Гольдштейн М. И. Металлофизика высокопрочных сплавов / М. И. Гольдштейн, В. С. Литвинов, Б. М. Бронфин – М.: Металлургия, 1986. – 307с.

Goldshiteyn M. I., Litvinov V.S., Bronphin B. M. Metallofizika vysokoprotchnykh splavov [Metallophysics high strength alloys]. Moscow, Metallurgy, 1986. 307 p.

<http://www.twirpx.com/file/942910/>

7. Эшби И. Ф. О напряжении Орована / И. Ф. Эшби // Физика прочности и пластичности. – М.: Металлургия, 1972. – С. 88 – 107.

Eshbi I. F. O naghzygchenii Orovana [About voltage Orowan]. Phizika gchnosti i plastichnosti – Physics of Strength and Plasticity – Moscow, Metallurgy, 1972. pp. 88 – 107.

<http://urss.ru/cgi-bin/db.pl?lang=ru&blang=ru&page=Book&id=48513>

8. Маркашова Л. И. Сварные соединения сложнолегированных алюминий-литиевых сплавов. Структура и эксплуатационные свойства / Л. И. Маркашова, О. С. Купнарева // Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Сб. научн. тр. № 64, – Днепропетровск, ПГАСА, 2012. – С. 75 – 80.

Markashova L. I. Welded joints complexly aluminum-lithium alloys. The structure and performance properties / L. I. Markashova, O. S. Kushnareva // Building, materials sciences, mechanic engineering: Collection of scientific papers Issue№64 – Dnipropetrovsk, PSAES, 2012. – p. 75 – 80.

<http://pgasa.dp.ua/a/international%20conferences/starodubov/archive/referats%20of%20starodubov%202012-64.pdf>

9. Гордиенко Л. К. Сверхмелкое зерно в металлах / Л. К. Гордиенко. – М.: Металлургия, 1973. – 384 с.

Gordienko L.K. Sverkhmelkoe zerno a metallakh [Ultrafine grains in metals]. Moscow, Metallurgy, 1973. 384 p.

<http://library.univer.kharkov.ua/OpacUnicode/index.php?url=/notices/index/IdNotice:750483/Source:default#>

10. Petch N. J. The cleavage strength of polycrystalline // J. Iron and Steel Inst. – 1953. – 173, № 1. – P. 25 – 28.

<http://garfield.library.upenn.edu/classics1982/A1982NM35100001.pdf>

11. Orowan E. Dislocation in Metals. – New York: АIME, 1954. – 103 p.

<http://www.tms.org/pubs/Books/PDFs/09-1003-e/09-1003-0.pdf>

12. Markashova L. Effect of Structure on the Mechanical Properties of the Metal of Welded Joints of Aluminum Alloys of the Al–Cu–Li System / L. Markashova, O. Kushnareva // Materials Science: Volume 49, Issue 5 (2014), Page 681–687.

<http://link.springer.com/article/10.1007/s11003-014-9662-2>

13. Маркашова Л. И. Сварные соединения жаропрочных титановых сплавов, легированных кремнием. Структура, прочность, трещиностойкость / Л. И. Маркашова, С. В. Ахонин, Г. М. Григоренко и др. // Автоматическая сварка. – 2012. – №11. – С. 7 – 17.

Markashova L. I., Akhonin S.V., Grigorenko G.M. et al. Svamyе soedineniay gcharoprotchnykh titanovykh splavov, legirovannykh kremniem. Struktura, prochnost, tretchinostoykost [Welded joints of heat-resistant titanium alloys doped with silicon. Structure, strength, fracture toughness]. Avtomaticheskaya svarka – Automatic Welding, 2012. – no 11, pp. 7 – 17.

<http://patonpublishinghouse.com/as/pdf/2012/as201211al1.pdf>

*Статья рекомендована к публикации д-ром. техн. наук, проф. В. И. Большаковым (Украина); д-ром. техн. наук Д. В. Лаухиньым (Украина)*

Поступила в редколлегию 21.01.2015

Принята к печати 24.03.2015