

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИНТЕРМЕТАЛЛИДОВ СИСТЕМЫ TiAl\*

Л.М. Лобанов, Е.А. Аснис, Н.В. Пискун, Э.Л. Вржижевский, А.С. Миленин, Е.А. Великоиваненко\*\*  
ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В работе было исследовано напряженное состояние сварных соединений интерметаллида системы TiAl. Определено влияние напряженного состояния сварного шва на образование холодных трещин. Была создана математическая модель и проведены вычислительные эксперименты по определению остаточных сварочных напряжений в сварном соединении. Методами оптической и электронной микроскопии была исследована структура сварных соединений интерметаллида системы титан–алюминий. При этом установлена взаимосвязь скорости охлаждения материала после окончания процесса сварки и структуры сварного соединения. По результатам проведенных численных экспериментов и металлографических исследований была разработана технология сварки интерметаллидного сплава с последующей локальной термообработкой, позволяющей получать бездефектные сварные соединения. Библиогр. 7, рис. 4.

*Ключевые слова:* интерметаллид, электронно-лучевая сварка, напряжения, холодные трещины, локальная термическая обработка

Интерметаллидные сплавы системы TiAl считаются перспективными материалами при производстве турбин авиационных двигателей и других изделий аэрокосмической техники, а также для автомобилестроения и для энергогенерирующих турбин в тепловых электростанциях. Они отличаются высокой прочностью, жаропрочностью, ползучестью, хорошей коррозионной стойкостью при высоких температурах. Однако при всех указанных достоинствах они характеризуются низкой пластичностью при комнатных температурах, что приводит к значительным трудностям при получении различных полуфабрикатов. Поэтому успешная реализация сплавов системы TiAl зависит от достижения подходящей комбинации пластичности при комнатной температуре, прочности, усталостной прочности, ползучести, трещиностойкости, а также стойкости к окислению и коррозии. Требуемые механические свойства тесно связаны с такими факторами как химический состав, микроструктура и технология обработки. Одним из вариантов повышения пластичности является легирование сплавов элементами, позволяющими оказывать влияние на формирование структуры в процессе остывания сплава [1]. Промышленная реализация этих сплавов также зависит от разработки технологий их соединения. Из интерметаллидов может быть изготовлен ши-

рокий ассортимент изделий, часть из которых являются сварными узлами, поэтому разработка технологии сварки интерметаллида системы TiAl является весьма актуальной [2].

Электронно-лучевая сварка (ЭЛС) — один из наиболее перспективных методов получения сварных соединений указанных материалов [3]. При получении сварных соединений интерметаллидов системы TiAl существенным их дефектом являются холодные трещины в швах, которые возникают при температурах ниже 700 °С, когда материал переходит из вязкого в хрупкое состояние. Хрупкость сварного шва в состоянии после сварки, в свою очередь, определяется его структурой и, при нарастании сварочных напряжений в процессе остывания приводит к появлению дефектов типа холодных трещин, источником которых являются микротрещины, дислокации и др.

Целью данной работы было исследование напряженно-деформированного состояния сварных соединений интерметаллидов системы TiAl и разработка технологии сварки, позволяющей получать бездефектные сварные соединения.

Для вычисления величины сварочных напряжений необходимо учесть тепловое воздействие на свариваемый металл, определяемое погонной энергией при сварке. Наиболее важной характеристикой погонной энергии является то, что она определяет скорость остывания металла и, следовательно, воздействует на микроструктуру свар-

Л.М.Добанов — <http://orcid.org/0000-0001-9296-2335>

\*Публикуется по материалам доклада, представленного на международной конференции «Инновационные технологии и инжиниринг в сварке и родственных технологиях – POLYWELD 2019», 23-24 мая, 2019 г., НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского».

\*\*В работе принимали участие И.Л. Богайчук, Г.Ф. Розынка, И.И. Статкевич, Т.Г. Таранова.

ного шва и околошовной зоны. Поскольку ЭЛС проходит при высокой концентрации энергии, то в результате образовавшаяся ЗТВ имеет незначительные размеры 1 мм [4].

Сварку образцов интерметаллидного сплава системы TiAl (Ti-44Al-5Nb-3Cr-1,5Zr) размером 30×100 мм толщиной 3 мм проводили при погонной энергии 2500 Дж/см.

Сварные швы интерметаллида системы TiAl, полученные ЭЛС при указанной погонной энергии сварки имели поперечные холодные сквозные трещины, проходящие через шов в околошовную зону и основной материал.

Зарождение холодных трещин при сварке происходит на стадии охлаждения в результате нарастания напряжений. Для расчетов напряженного состояния была создана математическая модель, на основании которой проведены вычислительные эксперименты.

Для свариваемых пластин толщиной 3 мм ЭЛС проходит в режиме кинжального проплавления, поэтому температурное поле можно рассматривать равномерным по толщине [5]. Кинетика температур может быть описана с помощью нестационарного уравнения теплопроводности:

$$c\gamma(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla[\lambda(T)\nabla T] - \frac{\alpha_T(T - T_0) + \epsilon_0\sigma_{SF}(T^4 - T_0^4)}{\delta} + q, \quad (1)$$

где  $c\gamma$ ,  $\lambda$  — зависящие от температуры объемная теплоемкость и теплопроводность металла, соответственно;  $T$  — температура конструкции в момент времени  $t$  в точке с координатами  $(x, y)$ ;  $\alpha_T$  — коэффициент поверхностной теплоотдачи в оснастку (опорный стол);  $\epsilon_0$  — степень черноты поверхности пластин;  $\sigma_{SF}$  — константа Стефана-Больцмана;  $T_0$  — температура окружающей среды;  $q$  — поток тепла от источника сварочного нагрева в рассматриваемой области поверхности, который в случае кинжального проплавления при ЭЛС может быть описан, как

$$q = \frac{\eta UI}{\pi\delta K_s} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{K_s}\right), \quad (2)$$

где  $\eta$  — коэффициент полезного действия источника сварочного нагрева;  $U$  — ускоряющее напряжение на электронно-лучевой пушке;  $I$  — сварочный ток;  $K_s$  — коэффициент концентрации потока энергии в электронном пучке.

Граничные условия к уравнению теплопроводности (1) для рассматриваемого случая ЭЛС в вакууме имеют вид:

$$-\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial n} = \begin{cases} \alpha_T(T - T_C), & \text{в области контакта с оснасткой} \\ \epsilon_0\sigma_{SF}(T^4 - T_C^4), & \text{на свободных поверхностях} \end{cases} \quad (3)$$

где  $n$  — нормаль к поверхности конструкции.

На рис. 1 показано распределение остаточных сварочных напряжений по длине шва, полученных с помощью вычислительного эксперимента.

Наибольший уровень остаточных напряжений — 330 МПа наблюдается в центре шва, что подтверждается также данными, полученными методом рентгеноструктурного анализа — 335 МПа. На основном материале напряжения из растягивающих переходят в сжимающие. Сварочные напряжения, возникающие в процессе остывания образца, в сочетании с хрупкой структурой металла шва, приводят, в свою очередь, к появлению дефектов типа холодных трещин.

Металлографические исследования структуры и поверхности излома сварного шва показаны на рис. 2. Микроструктура сварного шва рис. 2, а состоит из  $\gamma$ -TiAl- и  $\alpha_2$ -Ti<sub>3</sub>Al-фаз. Сварной шов имеет твердость 5100...5300 МПа. По данным фрактографических исследований (рис. 2, б) видно, что разрушение сварных образцов наблюдается в упругой области транскристаллитным изломом. На поверхности излома наблюдаются участки с различной структурой. В металле шва развитие магистральной трещины проходило ступенчато.

Указанная структура является малопластичной. При высокой скорости охлаждения металла шва — 500 °C/c, создаются условия для образования метастабильных фаз, увеличивающих склонность металла к холодному растрескиванию. Большую роль в образовании трещин играют остаточные сварочные напряжения и, особенно, нарастание их в процессе остывания в результате высокого температурного градиента. В целях борьбы с холодными трещинами необходимо обеспечить замедленную скорость охлаждения со снижением температурного градиента и, соответственно, уровень напряженного состояния [6]. Снижение на-

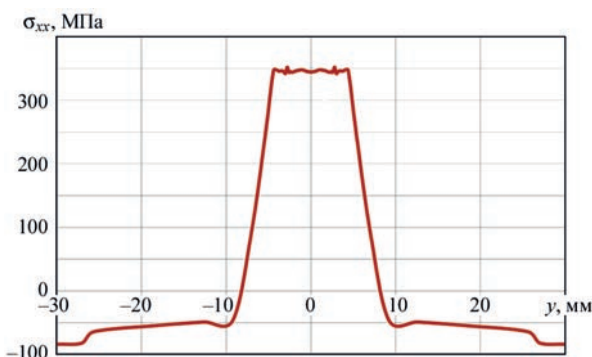


Рис. 1. Распределение продольных напряжений по длине шва

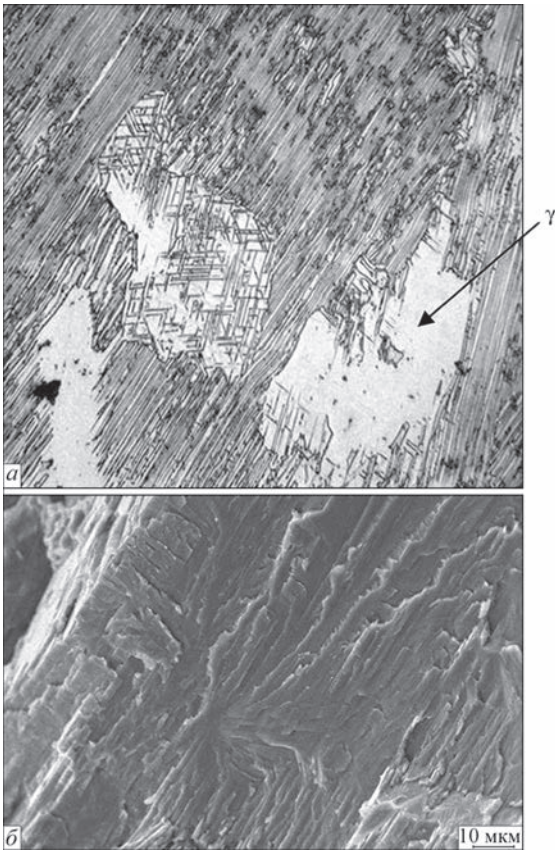


Рис. 2. Микроструктура металла шва (а) и поверхность излома сварного шва (б), полученного ЭЛС

пряженного состояния является важным фактором в борьбе с образованием холодных трещин. Для этого необходимо проводить термическую обработку сварных соединений.

В связи с тем, что трещины образуются непосредственно после сварки, отсутствует возможность проведения термообработки в стационарной печи. Наиболее рациональной является локальная термообработка (ЛТО) электронным лучом. Нами разработана ЛТО сварных соединений интерметаллида системы TiAl с регулируемой скоростью остывания. Этот процесс осуществляется следующим образом: непосредственно после сварки электронный луч выводится на середину сварного шва и с помощью специальной компьютерной программы разворачивается до требуемой конфигурации в одну и другую сторону от середины до конца шва. При этом луч остается неподвижным, а сварочный ток снижается на 1/3.

Благодаря снижению сварочного тока погонная энергия в процессе ЛТО уменьшается до 1700 Дж/см, что в 1,5 раза меньше по сравнению с этим же показателем при сварке.

Время указанной термообработки составляет 5 мин. При этом, как показали исследования, температура сварного соединения поддерживается до 950 °С. Скорость охлаждения в этом случае снижается до 30 °С/с. В связи с этим, уменьша-

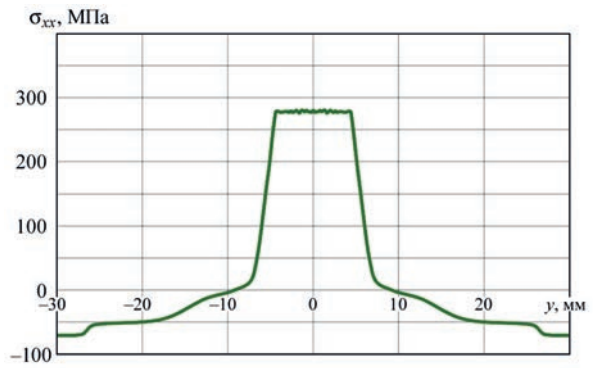


Рис. 3. Распределение продольных напряжений по длине шва после ЛТО

ется температурный градиент и, соответственно, сварочные остаточные напряжения снижаются до 260 МПа. В этом случае холодные трещины в сварных швах, практически, не образуются. На рис. 3 показано напряженное состояние сварного соединения после ЛТО.

Разработанная технологическая схема ЭЛС и термообработки позволяет снизить уровень остаточных сварочных напряжений более, чем на 25 %.

Металлографические исследования сварного соединения, полученного ЭЛС с последующей ЛТО (рис. 4, а) показали, что металл шва имеет трехкомпонентную структуру: матрицу  $\gamma$ -TiAl-фазы, колонии ( $\gamma$ -TiAl +  $\alpha_2$ -Ti<sub>3</sub>Al)-фаз и выделениями остаточной  $\beta_0$ (B2)-фазы по границам колоний. Твердость металла шва составля-

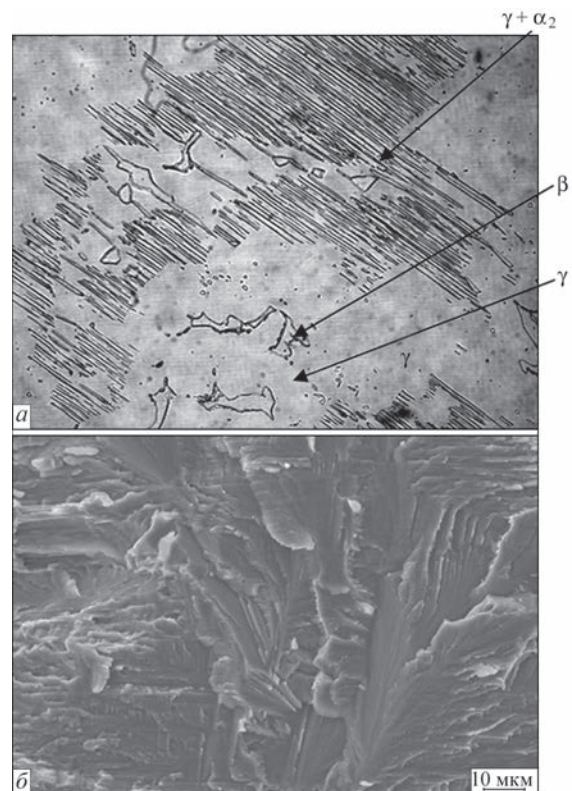


Рис. 4. Микроструктура ( $\times 200$ ) металла шва (а) и поверхность излома (б), полученного ЭЛС с последующей термообработкой

ет 4400...4500 МПа. Показано [7], что подобная структура несколько повышает пластичность и, в сочетании с более низкими напряжениями, чем в исходном состоянии, трещиностойкость сварного шва интерметаллида.

Исследования изломов образцов, полученных по предложенной схеме ЭЛС+ЛТО показали, что разрушение проходит по интеркристаллитному механизму. На рис. 4, б приведена фрактография сварного шва. Разрушение металла шва межзеренное. Наблюдается дробление  $\gamma$ -фазы за счет дисперсных выделений  $\alpha_2$ -фазы. На поверхности излома фасетки скола разделены участками отрыва, что обусловлено пластическим сдвигом и является признаком пластичности материала. Можно считать, что материал в какой-то степени сопротивляется разрушению и имеет некоторую пластичность.

Сравнивая рис. 2 и 4 можно также сказать, что высокая погонная энергия при сварке обеспечивает более крупнозернистую структуру металла шва по сравнению с термообработкой на более низкой погонной энергии.

Таким образом, разработанные режимы локальной термической обработки позволяют, в результате уменьшения погонной энергии, замедлить скорость охлаждения сварного шва и, тем самым, создать благоприятные структурные изменения, а также значительно снизить напряженное состояние сварных соединений и практически избежать образования холодных трещин.

### Выводы

Разработана математическая модель и проведены вычислительные эксперименты, позволившие рассчитать напряженное состояние сварного шва интерметаллида в исходном состоянии после сварки и ЛТО.

Скорость охлаждения при применении термообработки составляет 30 °С/с по сравнению со скоростью охлаждения непосредственно после сварки — 500 °С/с.

Уменьшение погонной энергии в 1,5 раза замедляет скорость охлаждения сварного шва, что способствует образованию трехкомпонентной структуры: матрица  $\gamma$ -TiAl-фазы, колонии

( $\gamma$ -TiAl +  $\alpha_2$ -Ti<sub>3</sub>Al)-фаз и выделения остаточной  $\beta_0$ (B2)-фазы по границам колоний, что позволяет увеличить пластичность сварного шва.

При применении термообработки снижается температурный градиент и, соответственно, сварочные напряжения уменьшаются более, чем на 25 %.

Показано, что использование ЛТО позволяет значительно улучшить структуру металла шва, снизить величину остаточных сварочных напряжений и, тем самым, повысить трещиностойкость сварного шва.

### Список литературы

1. Kartavykh A.V., Asnis E.A., Piskun N.V. et al. (2015) Microstructure and mechanical properties control of c-TiAl(Nb, Cr, Zr) intermetallic alloy by induction float zone processing. *Journal of Alloy and Compounds*, **643**, 182–166.
2. Ильин А.А., Калачов Б.А., Полькин И.С. (2009) *Титановые сплавы состав, структура, свойства*. Москва, ВИЛС-МАТИ.
3. Патон Б.Е. (ред.) (1987) *Электронно-лучевая сварка*. Киев, Наукова думка.
4. Рыкалин Н.Н. (2012) *Расчеты тепловых процессов при сварке*. Изд-е 1951, Москва, «Книга по Требованию».
5. Махненко В.И. (1976) *Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций*. Киев, Наукова думка.
6. Chen Guoging, Zhang Binggang, Liu Wei, Feng Jicai (2011) Crack formation and control upon the electron beam welding of TiAl-based alloys. *Journal of Intermetallics*, **19**, 1857–1863.
7. Поварова К.Б., Банных О.А. (1999) Принципы создания конструкционных сплавов на основе интерметаллидов. Ч. I. *Материаловедение*, **3**, 27–33.

### References

1. Kartavykh, A.V., Asnis, E.A., Piskun, N.V. et al. (2015) Microstructure and mechanical properties control of c-TiAl (Nb, Cr, Zr) intermetallic alloy by induction float zone processing. *J. of Alloy and Compounds*, **643**, 182-186.
2. Iliin, A.A., Kalachov, B.A., Polkin, I.S. (2009) *Titanium alloys, composition, structure, properties*. Moscow, VILS-MATI [in Russian].
3. (1987) *Electron beam welding*. Ed. by B.E. Paton. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
4. Rykalin, N.N. (2012) *Calculations of thermal processes in welding*. Moscow. Reedition of 1951 [in Russian].
5. Makhnenko, V.I. (1976) *Calculation methods of investigation of kinetics of welding stresses and strains*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
6. Chen Guoging, Zhang Binggang, Liu Wei, Feng Jicai (2011) Crack formation and control upon the electron beam welding of TiAl-based alloys. *J. of Intermetallics*, **19**, 1857-1863.
7. Povarova, K.B., Bannykh, O.A. (1999) Principles of creation of structural alloys based on intermetallics. Pt 1. *Materialovedenie*, **3**, 27-33 [in Russian].

## ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ІНТЕРМЕТАЛІДІВ СИСТЕМИ TiAl

Л.М. Лобанов, Ю.А. Асніс, Н.В. Піскун, Е.Л. Вржижевський, О.С. Міленін, О.А. Великоіваненко

ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В роботі було досліджено напружений стан зварних з'єднань інтерметаліда системи TiAl. Визначено вплив напруженого стану зварного шва на утворення холодних тріщин. Була створена математична модель і проведені обчислювальні експе-

рименти по визначенню залишкових зварювальних напружень у зварному з'єднанні. Методами оптичної та електронної мікроскопії була досліджена структура зварних з'єднань інтерметаліда системи титан-алюміній. При цьому встановлено взаємозв'язок швидкості охолодження матеріалу після закінчення процесу зварювання і структури зварного з'єднання. За результатами проведених численних експериментів та металографічних досліджень була розроблена технологія зварювання інтерметалідного сплаву з подальшою локальною термообробкою, що дозволяє отримувати бездефектні зварні з'єднання. Бібліогр. 7, рис. 4.

*Ключові слова:* інтерметаліди, електронно-променеве зварювання, напруги, холодні тріщини, локальна термічна обробка

## INVESTIGATION OF STRESS-STRAIN STATE OF WELDED JOINTS OF INTERMETALLICS OF THE SYSTEM TiAl

L.M. Lobanov, Yu.A. Asnis, N.V. Piskun, E.L. Vrzhezhevsky, O.S. Milenin, O.A. Velikoivanenko

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.  
11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kyiv.ua

In the work, stress state of welded joints of intermetallic of the TiAl system was investigated. The influence of stress state of the weld on cold cracks formation was determined. A mathematical model was created and computational experiments were carried out to determine residual welding stresses in welded joint. Using the methods of optical and electron microscopy, the structure of welded joints of intermetallic of titanium-aluminum system was studied. At the same time, the relationship between the cooling rate of the material after the end of welding process and the structure of welded joint was established. Based on the results of numerical experiments and metallographic examinations, a technology for welding of intermetallic alloy with a subsequent local heat treatment was developed, which allows producing defect-free welded joints. 7 Ref., 4 Fig.

*Keywords:* intermetallic, electron beam welding, stresses, cold cracks, local heat treatment

Поступила в редакцію 31.07.2019

## XII Международная выставка «UzMetalMashExpo-2020» Металлургия/Металлообработка/Станкостроение/Сварка

24–26 марта 2020 г.

Ташкент, Узбекистан



### Сварка

- ▶ Оборудование и технологии для всех видов сварки, наплавки и пайки
- ▶ Оборудование и технологии для термической обработки
- ▶ Материалы для сварки, резки, наплавки, напыления, пайки
- ▶ Средства и методы защиты
- ▶ Контроль качества сварных соединений
- ▶ Инструменты и приспособления для сварки
- ▶ Научные разработки в области сварки
- ▶ Модернизация сварочных производств на промышленных предприятиях
- ▶ Энергосберегающие технологии сварочных и термических производств
- ▶ Автоматизация и роботизация технологических процессов
- ▶ Измерительная техника, техническая диагностика и неразрушающий контроль

[www.ieg.uz](http://www.ieg.uz)