К. А. Курган и др. Эволюция в пространстве и во времени деформационных полей в поверхностном слое в области сварного шва титанового сплава BT1-0...

УДК 621.791.01:539.3 DOI 10.18101/2306-2363-2018-2-3-33-38

ЭВОЛЮЦИЯ В ПРОСТРАНСТВЕ И ВО ВРЕМЕНИ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПОЛЕЙ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ В ОБЛАСТИ СВАРНОГО ШВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ1-0 В СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ СОСТОЯНИИ

© Курган Кирилл Андреевич

аспирант, Томский государственный архитектурно-строительный университет 634003 г. Томск, площадь Соляная, 2 E-mail: kirill_k2.777@mail.ru

© Устинов Артем Михайлович

аспирант, Томский государственный архитектурно-строительный университет 634003 г. Томск, площадь Соляная, 2 E-mail: artemustinov@bk.ru

© Клопотов Анатолий Анатольевич

доктор физико-математических наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет 634003 г. Томск, площадь Соляная, 2 E-mail: klopotovaa@tsuab.ru

© Потекаев Александр Иванович

доктор физико-математических наук, профессор, Национальный исследовательский Томский государственный университет 634003 г. Томск, проспект Ленина, 36 E-mail: potekaev@spti.tsu.ru

© Абзаев Юрий Афанасьевич

доктор физико-математических наук, профессор Томский государственный архитектурно-строительный университет 634003 г. Томск, площадь Соляная, 2 E-mail: abzaev2010@yandex.ru

© Мелентьев Сергей Владимирович

кандидат физико-математических наук, доцент Томский государственный архитектурно-строительный университет 634003 г. Томск, площадь Соляная, 2 E-mail: sergey.melentev.88@mail.ru

© Бадеников Артем Викторович

кандидат технических наук, профессор, Ангарский государственный технический университет 665835, г. Ангарск, ул. Чайковского, 60 E-mail: info@angtu.ru

© Зеленков Алексей Андреевич

студент,

Национальный исследовательский Томский политехнический университет 634050 г. Томск, проспект Ленина, 30 E-mail: alexeyzelenkov@yandex.ru

На основе применения цифровой оптической системы Vic-3D получены данные по эволюции в пространстве и во времени деформационных полей в приповерхностном слое сплава BT1-0 в области сварного шва, полученного электронно-лучевой сваркой, в субмикрокристаллическом состоянии. Установлено, что при растяжении образца в районе сварного шва на начальной стадии в области упругой деформации образуются локализованные очаги деформации с отрицательными значениями упругой деформации.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка; деформационные кривые; субмикрокристаллический титановый сплав ВТ1-0; распределение деформационных полей.

Введение

При изготовлении современных конструкций и механизмов часто используют соединения элементов при помощи сварки [1]. В настоящее время очень актуальны исследования сварных соединений металлов и сплавов в нано- и субмикрокристаллическом состояниях, однако таких работ не много [2]. Следует отметить, что подобные сплавы образуют своеобразные структурно-фазовые состояния в области сварного шва [2], что находит отражение в механических свойствах сварных швов в сплавах в нано- и субмикрокристаллическом состояниях.

Целью настоящей работы явилось исследование распределения деформационных полей в области сварного шва, полученного электронно-лучевой сваркой, при деформации растяжением титанового сплава BT1-0 в субмикрокристаллическом состоянии.

Методика проведения эксперимента

Испытание образцов на растяжение осуществлялось на испытательной машине «INSTRON 3386» с максимальным растягивающим усилием 100 кН (10,19 тс). Деформирование проводилось с постоянной скоростью 80 с⁻¹. Для определения эволюции распределения деформаций в приповерхностных слоях образца использовалась оптическая измерительная система Vic-3D [3].

Титан субмикрокристаллического строения был приготовлен путем многократного одноосного прессования (*abc*-прессование) в сочетании с прокаткой. Описание спекл-картины на поверхности образцов приведено в [2].

Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведена деформационная кривая в координатах «напряжение – относительная деформация» ($\sigma = f(\epsilon)$), полученная при растяжении образца из титанового сплава ВТ1-0 в субмикрокристаллическом состоянии. Представленная на рис. 1 деформационная кривая совпадает с растяжении образца из титанового сплава ВТ1-0 в субмикрокристаллическом состоянии. Деформационная кривая совпадает с приведенными в литературе кривыми [4]. На зависимости $\sigma = f(\epsilon)$ (рис. 1, кривая *A*) можно выделить ряд стадий. Упругая стадия I имеет линейный характер $\sigma = E\epsilon$ (E - модуль нормальной упругости). Далее следует стадия II, которая соответствует переходу от упругой деформации к пластической. Стадия III соответствует пластической деформации сплава. На этой стадии ко-

К. А. Курган и др. Эволюция в пространстве и во времени деформационных полей в поверхностном слое в области сварного шва титанового сплава BT1-0...

эффициент деформационного упрочнения имеет невысокие значения, характерные для титановых сплавов [4].

На рис. 2 представлены картины распределения деформационных полей на приповерхностном слое пластины сплава ВТ1-0 в субмикрокристаллическом состоянии со сварным швом на разных стадиях деформационной зависимости $\sigma = f(\varepsilon)$ (кривая *Б*, рис. 16). Анализ картин распределения деформационных полей на приповерхностных слоях образца на стадии I при растяжении позволил выявить ряд интересных особенностей.



Рис. 1. Диаграммы деформирования титанового сплава ВТ1-0 в субмикрокристаллическом состоянии: *a* – исходный образец; *б* – в увеличенном масштабе деформационные кривые исходного образца (кривая *A*) и образца со сварным швом (*Б*). Цифры соответствуют положению картин деформационных структур на кривой *Б* рис. 2. *I* –стадия упругой деформации; *II* – переходная стадия; *III* –стадия пластической деформации

Во-первых, на начальном этапе на I стадии в районе сварного шва наблюдаются два локализованных участка с отрицательными значениями упругой деформации (рис. 16, точка 1 и рис. 2, картина 1). Тогда как, по всей поверхности образца вдали от сварного шва наблюдаются хаотически расположенные очаги с положительными, отрицательными и нулевыми значениями деформации. В этих локальных очагах значения деформации соответствуют упругой стадии.

Во-вторых, с дальнейшим увеличением приложенного растягивающего напряжения в пределах стадии I (переход из точки 1 в точку 2 на деформационной кривой, рис. 1б), две макроскопические локальные области в районе сварного шва с отрицательными значениями сливаются в одну протяженную область с положительным значением деформации. Причем, в районе сварного шва деформационная область имеет более низкие значения, чем на поверхности образца вдали от сварного шва. При этом макроскопические по своим размерам очаги пластической деформаций и локальные упругодеформированные участки, которые наблюдались на картине 1 (рис. 2), трансформируются на основной части

ВЕСТНИК БУРЯТСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА ХИМИЯ. ФИЗИКА

поверхности образца в микроскопические очаги с более высокими значениями деформации (картина 2 на рис. 2).



Рис. 2. Картины распределений вертикальных относительных деформаций на поверхности образца со сварным швом сплава ВТ1-0 в субмикрокристаллическом состоянии. Цифры на диаграмме рис. 1 соответствуют деформационно-напряженным состояниям образца

В-третьих, переход на деформационной кривой от стадии I к стадии II (точки 3 и 4 на кривой *Б*, рис. 1*б*) сопровождается появлением в районе сварного шва очагов пластической деформации с высокими значениями деформации, которые в 3–4 раза превышают значения на поверхности образца вне сварном шве (картины 3 и 4 на рис. 2).

К. А. Курган и др. Эволюция в пространстве и во времени деформационных полей в поверхностном слое в области сварного шва титанового сплава BT1-0...

В-четвертых, пластическая деформация на III стадии на кривой $\sigma=f(\varepsilon)$ проявляется в увеличении более чем на порядок пластической деформации в локальной области сварного шва относительно деформации по поверхности образца вне его (картины 5 и 6 на рис. 2).

Таким образом, при помощи оригинальной цифровой оптической системы Vic-3D получены уникальные данные по эволюции в пространстве и во времени деформационных полей в приповерхностном слое сплава ВТ1-0 в субмикрокристаллическом состоянии при растяжении образца со сварным швом, полученным электронно-лучевой сваркой. Установлено, что при растяжении образца в районе сварного шва на начальной стадии в области упругой деформации образуются локализованные очаги деформации с отрицательными значениями упругой деформации.

Литература

1. Металлургия и технология сварки титана и его сплавов. Киев: Наукова думка, 1979. 300 с.

2. Клименов В.А., Гнюсов С.Ф., Потекаев А.И. и др. Структура и свойства микрокристаллического и субмикркристаллического титанового сплава ВТ1-0 в области шва при электронно-лучевой сварке // Изв. ВУЗов. Физика. 2017. Т. 60, № 6. С. 62–70.

3. Копаница Д.Г., Устинов А.М., Потекаев А.И., Клопотов А.А., Марченко Е.С. Изменения напряженно-деформированных состояний приповерхностных слоев стали в процессе нагружения // Изв. ВУЗов. Физика. 2017. Т. 60, № 9. С. 105–113.

4. Разоренов С.В., Савиных А.С., Зарецкий Е.Б., Капель Г.И., Колобов Ю.Р. Влияние предварительного деформационного упрочнения на напряжение течения при ударном сжатии титана и титанового сплава // ФТТ. 2005. Т. 47, вып. 4. С. 639–646.

EVOLUTION OF STRAIN FIELDS IN SPACE AND TIME IN THE SURFACE LAYER IN THE SEAM WELDED AREA OF TITANIUM ALLOY VT1-0 IN A SUBMICROCRYSTALLINE STATE

Kirill A. Kurgan postgraduate Tomsk State University of Architecture and Building 2 Solyanaya sq., Tomsk, 634003, Russia E-mail: kirill_k2.777@mail.ru

Artem M. Ustinov postgraduate Tomsk State University of Architecture and Building 2 Solyanaya sq., Tomsk, 634003, Russia E-mail: artemustinov@bk.ru

Anatoly A. Klopotov Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building 2 Solyanaya sq., Tomsk, 634003, Russia E-mail: klopotovaa@tsuab.ru

Aleksandr I. Potekaev Doctor of Physics and Mathematics, Professor, National Research Tomsk State University 36 Lenina pr., Tomsk, 634003, Russia Russia, E-mail: potekaev@spti.tsu.ru

Yury A. Abzaev

Doctor of Physics and Mathematics, Professor Tomsk State University of Architecture and Building 2 Solyanaya sq., Tomsk, 634003, Russia E-mail: abzaev2010@yandex.ru

Sergei V. Melentyev

candidate of Physical and Mathematical Sciences Tomsk State University of Architecture and Building 2 Solyanaya sq., Tomsk, 634003, Russia E-mail: sergey.melentev.88@mail.ru

Artem V. Badenikov candidate of Technical Sciences, Professor Angarsk State Technical University 60 Chaikovskogo str., Angarsk, 665835 Russia E-mail: info@angtu.ru

Aleksei A. Zelenkov student National Research Tomsk Polytechnic University 30 Lenina pr., Tomsk, 634050, Russia E-mail: alexeyzelenkov@yandex.ru

Based on the application of the Vic-3D digital optical system, the data on the space and time evolution of deformation fields in the near-surface layer of the VT1-0 alloy in the weld region obtained by electron beam welding in the submicrocrystalline state are obtained. It is found that when the sample is stretched in the area of the weld at the initial stage, localized deformation foci with negative values of elastic deformation are formed in the area of elastic deformation.

Keywords: electron beam welding; deformation curves; submicrocrystalline titanium alloy VT1-0; distribution of deformation fields.