

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 621.791.722:661.88

КУРГАН КИРИЛЛ АНДРЕЕВИЧ, аспирант,

kirill_k2.777@mail.ru

КЛИМЕНОВ ВАСИЛИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ, докт. техн. наук, профессор,

klimenov@tpu.ru

*КЛОПОТОВ АНАТОЛИЙ АНАТОЛЬЕВИЧ, докт. физ.-мат. наук,
профессор,*

klopotovaa@tsuab.ru

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЕРДОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ КОНТАКТНОЙ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКЕ*

В работе представлены результаты исследований структуры и механических свойств сварного соединения, полученного контактной точечной сваркой титанового сплава ВТ6 в субмикроструктурном состоянии. Установлен немонотонный характер изменения микротвердости в области сварного шва. Значения микротвердости в зоне термического влияния сварного шва на 20 % меньше, чем микротвердость основного металла. В зоне ядра сварного шва микротвердость на 20 % больше, чем в зоне основного металла.

Ключевые слова: контактная точечная сварка; интенсивная пластическая деформация; субмикроструктурный титановый сплав ВТ6; ядро; зона термического влияния.

KIRILL A. KURGAN, Research Assistant,

kirill_k2.777@mail.ru

ALEKSANDR V. KLIMENOV, DSc, Professor,

klimenov@tpu.ru

ANATOLIY A. KLOPOTOV, DSc, Professor,

klopotovaa@tsuab.ru

*Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia*

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке работ по проекту Министерства образования и науки Российской Федерации и государственного задания в сфере научной деятельности (проект №11.351.2014/К).

HARDNESS TEST OF WELDED JOINTS PRODUCED BY RESISTANCE SPOT WELDING OF NANOSTRUCTURED TITANIUM ALLOY VT6

The paper presents the results of investigating the structure and mechanical properties of welded joints obtained by resistance spot welding of titanium alloy VT6 under the sub-microcrystalline condition. A nonmonotone microhardness modification is obtained in the weld zone. It is shown that microhardness in the heat-affected zone is 20 % lower than that of the base metal. At the same time, microhardness in the centre of the weld is 20 % higher than that in the base metal.

Keywords: resistance spot welding; severe plastic deformation; sub-microcrystalline titanium alloy; heat-affected zone.

В связи с прогрессом неизбежно растут требования к функциональным свойствам новых изделий, диктуемые стремлением к повышению качества жизни человека. Поэтому, чтобы повысить статическую прочность и долговечность титана, применяют методы интенсивной пластической деформации. Этот метод основан на уменьшении размера зерна и формировании ультрамелкозернистой (УМЗ) (средний размер зерна менее 1 мкм) или нанокристаллической (НК) структуры (средний размер зерна менее 0,1 мкм) [1, 2].

УМЗ титан нашел свое применение в авиационно-космической промышленности и медицине. Как известно, производство авиационно-космической техники и медицинских принадлежностей немислимо без использования различных видов сварки [3–5].

Поэтому исследование особенностей изменения структуры при контактной точечной сварке (КТС) титановых сплавов с УМЗ структурой является актуальной задачей. Решение этой задачи может позволить оптимизировать параметры процесса КТС и получить конструкции, обладающие повышенным комплексом технологических свойств.

Целью настоящей работы явилось изучение влияния процесса КТС на микроструктурные изменения в зоне сварного шва и свойства УМЗ образцов титанового сплава VT6.

Материалы и методы исследования

Исходным материалом исследования являются прутки $\varnothing 6 \times 100$ мм из УМЗ $\alpha + \beta$ -титанового сплава VT6. УМЗ состояние титанового сплава VT6 было получено при помощи интенсивной пластической деформации на универсальной испытательной машине INSTRON методом abc-прессования в интервале температур $(0,40 - 0,35)T_{пл}$ ($T_{пл}$ – температура плавления титана равна 1933 К).

Для контактной точечной сварки из прутков при помощи электроискровой резки вырезались пластинки $\varnothing 6$ мм и толщиной 0,2 мм. Для осуществления КТС применялся источник питания для контактной точечной микросварки (ИПКТМ). Для КТС применялось нахлесточное соединение деталей.

Анализ макро- и микроструктуры проводили с помощью оптического микроскопа Olympus GX51 (снимок приведен на рис. 1), имеющего анализатор изображений SIAMS 700, и растрового электронного микроскопа Leo Evo 50.

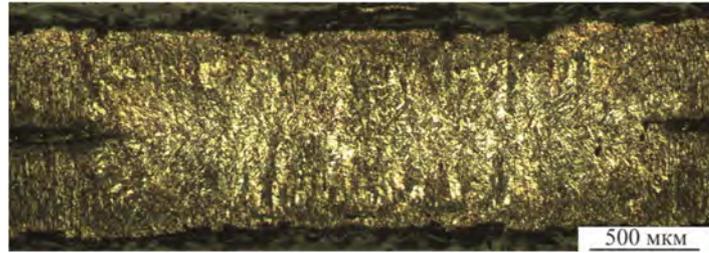


Рис. 1. Снимок поперечного сечения исследованного образца

Результаты эксперимента и обсуждение

Проведенные микроструктурные исследования показали, что в зоне сварного соединения отсутствуют видимые дефекты в виде непроваров, несплошностей, пор (рис. 1).

Было проведено измерение микротвердости в зоне сварного шва (рис. 2).

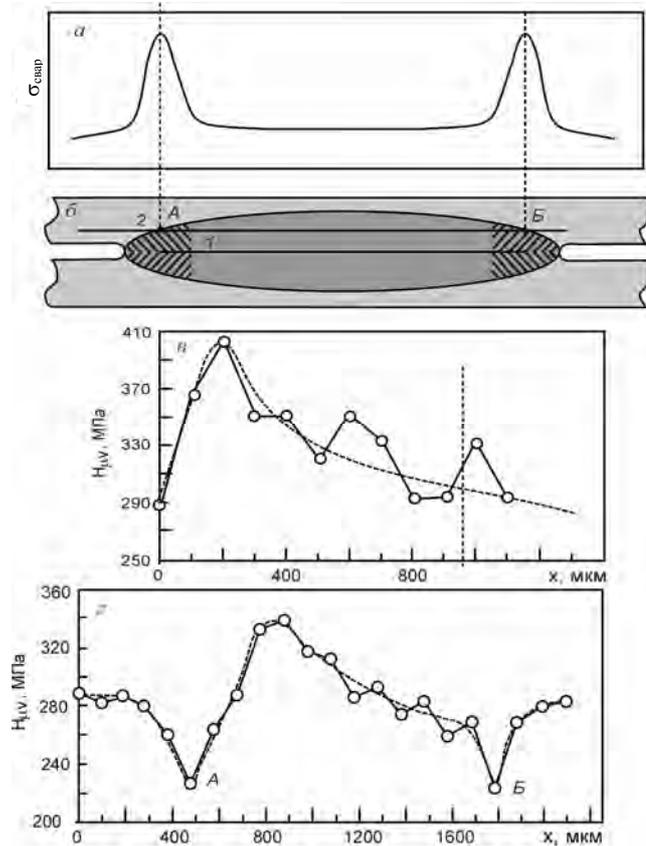


Рис. 2. Схематическое представление изменения концентрации сварочного напряжения ($\sigma_{\text{свар}}$) в зоне сварной точки (а); схема сварного соединения при контактной точечной сварке (1–2 – линии измерения микротвердости; А и Б – точки, показывающие место максимальной концентрации сварных напряжений) (б); график распределения микротвердости по линии 1 сварной точки (в); график распределения микротвердости по линии 2 сварной точки (г)

В работе [6] показано, что в разных зонах сварного шва наблюдается разная интенсивность сварочных напряжений. Согласно представлениям, развиваемым в работе [6], на рис. 2, *а* схематически представлены изменения концентрации сварочных напряжений ($\sigma_{\text{свар}}$) в зоне сварной точки. На рис. 2, *б* приведена схема сварного соединения при контактной точечной сварке, и линиями показаны измерения микротвердости непосредственно в ядре сварного шва (линия 1) и выше центра ядра (линия 2). Точки *A* и *B* характеризуют место максимальной концентрации сварочных напряжений.

Видно, что график зависимости микротвердости в зоне сварного шва имеет немонотонный характер с двумя минимумами по краям и одним максимумом в центре (рис. 2, *в, г*). Анализ литературных и полученных данных позволяет выделить три характерные зоны (рис 3, *а*).

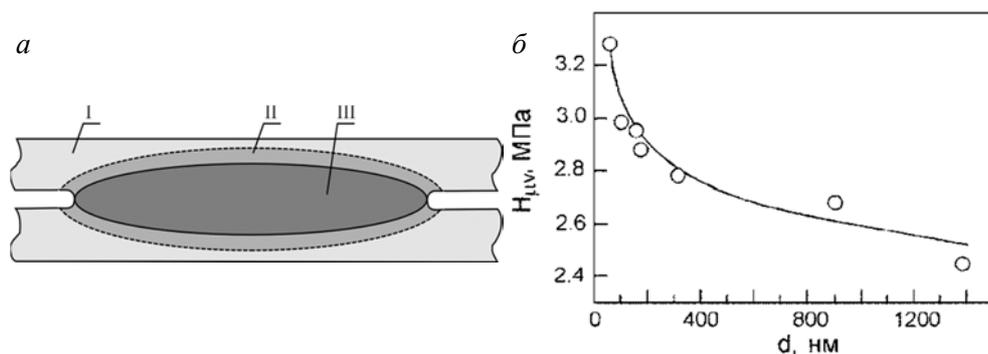


Рис. 3. Схема сварного соединения при контактной точечной сварке (зона I – зона основного металла, зона II – зона термического влияния, зона III – зона расплавленного металла (ядро)) (*а*); график зависимости микротвердости от размера зерна титана в различных структурных состояниях по данным работы [7] (*б*)

Зона I – зона основного металла. Для этой зоны характерно значение микротвердости субмикроструктурного титана. Согласно данным, таким значениям микротвердости соответствует средний размер зерна порядка 300 нм (рис. 3, *б*).

Зона II – зона термического влияния. Для этой зоны характерно такое изменение структурно-фазового состояния, при котором происходит разупрочнение материала [5]. Это изменение структурно-фазового состояния сопровождается уменьшением микротвердости и наличием пиков концентрации сварочных напряжений. Величина микротвердости в зоне II соответствует среднему размеру зерна порядка 1400 нм (рис. 3, *б*).

Зона III – зона расплавленного металла (ядро). В этой зоне при сварке происходит полное расплавление металла с последующим быстрым охлаждением. Такой процесс при КТС близок по своему характеру к лазерной сварке [3]. Это находит подтверждение в значительном увеличении микротвердости в этой зоне, поскольку при сверхбыстрой закалке расплавленного металла в ядре сварного шва происходит образование наноструктурного состояния. Полученное значение микротвердости в зоне III соответствует среднему размеру зерен в УМЗ титановых сплавах порядка 50 нм (рис. 3, *б*). Необходимо отметить, что, возможно, более высокое значение микротвердости в зоне III,

по сравнению с зоной основного металла, обусловлено образованием тонкопластинчатой структуры α -фазы титана.

Таким образом, проведенные исследования структуры и микротвердости сварных швов с УМЗ структурой титанового сплава ВТ6, полученных КТС, позволили выделить три характерные зоны. Зона I – зона основного металла. Зона II – зона термического влияния. Установлено, что в этой зоне произошло увеличение среднего размера зерна до 1400 нм. Зона III – зона расплавленного металла (ядро). В этой зоне при сварке происходит полное расплавление металла с последующим быстрым охлаждением. Возможно, что высокое значение микротвердости в зоне III обусловлено образованием тонкопластинчатой структуры α -фазы титана.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Валиев, Р.З.* Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией / Р.З. Валиев, И.В. Александров. – М. : Логос, 2000. – 272 с.
2. *Валиев, Р.З.* Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства / Р.З. Валиев, И.В. Александров. – М. : ИКЦ «Академкнига», 2007. – 398 с.
3. *Шоршоров, М.Х.* Сварка титана и титановых сплавов / М.Х. Шоршоров. – М. : Машиностроение, 1959. – 133 с.
4. *Николаев, Г.А.* Сварка в машиностроении : справочник : в 4 т. Т. 3 / Г.А. Николаев ; под ред. В.А. Винокурова. – М. : Машиностроение, 1979. – 567 с.
5. *Орлов, Б.Д.* Технология и оборудование контактной сварки / Б.Д. Орлов. – М. : Машиностроение, 1986. – 352 с.
6. *Орлов, Б.Д.* О прочности соединений из сплава Д16АТ, выполненных точечной сваркой / Б.Д. Орлов, В.Н. Шавырин, Н.А. Новосельцев. – 2010. – Условия доступа : <http://k-svarka.com/content/o-prochnosti-soedinenii-iz-splava-d16at-vypolnennykh-tochiechnoi-svarkoi> (дата обращения: 20.09.2015).
7. *Эволюция структуры и механических свойств ультрамелкозернистого титана / И.А. Курзина, И.А. Божко, М.П. Калашников, А.Ю. Ерошенко, Ю.П. Шаркеев // Материаловедение. – 2010. – № 5. – С. 48–55*

REFERENCES

1. *Valiev R.Z., Alexandrov I.V.* Nanostrukturnye materialy, poluchennye intensivnoi plasticheskoi deformatsiei [Nanostructured materials produced by severe plastic deformation]. Moscow : Logos Publ., 2000. 272 p. (rus)
2. *Valiev R.Z., Alexandrov I.V.* Ob'emnye nanostrukturnye metallicheskie materialy: poluchenie, struktura i svoistva [Bulk nanostructured metallic materials: production, structure and properties]. Moscow : Akademkniga Publ., 2007. 398 p. (rus)
3. *Shorshorov, M.Kh.* Svarka titana i titanovykh splavov [Welding of titanium and titanium alloys]. Moscow : Mashinostroenie-1 Publ., 1959. 133 p. (rus)
4. *Nikolaev A.* Svarka v mashinostroenii : spravochnik : v 4 t. T. 3 [Welding in machine building. In 4 vol.]. Moscow : Mashinostroenie-1 Publ., 1979. V. 3. 567 p. (rus)
5. *Orlov B.D.* Tekhnologiya i oborudovanie kontaktnoi svarki [Technology and equipment of contact welding]. Moscow : Mashinostroenie-1 Publ., 1986. 352 p. (rus)
6. *Orlov B.D., Saverin V.N., Novoseltsev N.A.* O prochnosti soedinenii iz splava D16AT, vypolnennykh tochiechnoi svarkoi [Strength of D16AT alloy joints produced by spot welding]. Available at : <http://k-svarka.com/content/o-prochnosti-soedinenii-iz-splava-d16at-vypolnennykh-tochiechnoi-svarkoi/> Last visited in Sept. 2015. (rus)
7. *Kurzina I.A., Bozhko I.A., Kalashnikov M.P., Eroshenko A.Yu., Sharkeev Y.P.* Evolyutsiya struktury i mekhanicheskikh svoystv ul'tramelkozernistogo titana [Evolution of structure and mechanical properties of ultrafine-grained titanium]. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2010. No. 5. Pp. 48–55. (rus)