



## ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА ЛИСТОВОГО ТЕХНИЧЕСКОГО ТИТАНА ВТ1-0, УПРОЧНЕННОГО АЗОТОМ В ПРОЦЕССЕ ДУГОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВА, И СВОЙСТВА ПОЛУЧЕННЫХ СОЕДИНЕНИЙ\*

В. Я. САЕНКО, А. А. ПОЛИШКО, В. А. РЯБИНИН, С. Н. СТЕПАНЮК

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton/kiev/ua

Показана эффективность применения электронно-лучевой сварки (ЭЛС) для получения равнопрочного сварного соединения из проката технического титана толщиной 35 мм, упрочненного азотом до 0,1 мас. % в процессе дугошлакового переплава (ДШП). Данные рентгеноспектрального анализа свидетельствуют о равномерном распределении азота, алюминия, титана, железа, кислорода как в прокате ДШП, так и в сварном соединении. Металлографические исследования подтвердили получение качественного сварного соединения без трещин, пор и других дефектов. Металл шва и основной металл характеризуются однородной структурой. Установлено равномерное распределение твердости  $HV$  и микротвердости  $HV$  в листовом техническом титане и полученном сварном соединении. При содержании в титане до 0,1 мас. % азота твердые включения нитрида титана отсутствуют и в листовом прокате ДШП, и в металле шва, выполненного ЭЛС. Библиогр. 13, рис. 5.

*Ключевые слова:* технический титан, дугошлаковый переплав, упрочнение титана азотом из газовой фазы, листовой прокат, электронно-лучевая сварка, макро- и микроструктура, механические свойства сварного соединения

Разработанный в начале 1970-х гг. в ИЭС им. Е. О. Патона новый способ переплава расходуемого электрода электрической дугой, горящей между торцом электрода и поверхностью жидкой шлаковой ванны в медном водоохлаждаемом кристаллизаторе, был запатентован в 1982 г. под названием дугошлаковый переплав (ДШП) [1]. В дальнейшем проведенные исследования, в том числе в заводских условиях, показали, что по сравнению с традиционным электрошлаковым переплавом новый способ ДШП экономически выгоден и позволяет получить металл, не уступающий по качеству металлу ЭШП.

Первые результаты исследований ДШП титана и его сплавов, проведенных в ИЭС в лабораторных и заводских условиях, показали [2–4] перспективность этого способа в решении задач удешевления производства полуфабрикатов титана и его сплавов, прежде всего технического чистого титана. Возможность получения крупнотоннажных слитков ДШП прямоугольного сечения с удовлетворительной поверхностью, не требующих механической обработки для непосредственной прокатки, позволяет существенно сократить потери металла при производстве титановых полуфабрикатов и снизить себестоимость готовой продукции.

Также важным фактором для удешевления титановой продукции является возможность реали-

зации одностадийного процесса ДШП губчатых прессованных электродов [5–7].

Титан и его сплавы отличаются лучшим сочетанием высоких механических свойств и низкой плотности по сравнению с другими конструкционными материалами. Технический титан ВТ1-0 при значительной коррозионной стойкости в различных агрессивных средах имеет сравнительно невысокие прочностные свойства ( $\sigma_b \leq 400$  МПа). Однако проблема успешно решается путем легирования титана алюминием, ванадием, марганцем, молибденом



Рис. 1. Макрошлифы углового и стыкового соединений листового технического титана, выполненных ЭЛС

\* Работа выполнена под руководством чл.-корр. НАН Украины О. К. Назаренко и В. М. Нестеренкова.

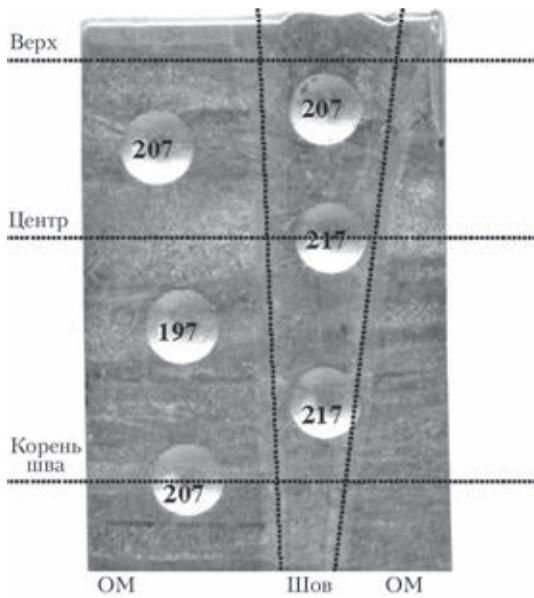


Рис. 2. Внешний вид образца сварного соединения листового технического титана и значения твердости по Бринеллю, полученные в продольном сечении

и другими элементами, причем без существенного снижения его пластических свойств. Как известно, на прочностные и пластические свойства технического титана значительное влияние оказывает содержание в нем кислорода и азота [8, 9]. Комплекс исследований, проведенных в ИЭС, показал возможность повышения прочностных характеристик технического титана ВТ1-0 за счет его легирования азотом до 0,1 % из газовой фазы в процессе ДШП [10]. В результате был получен технический титан ДШП, имеющий прочност-

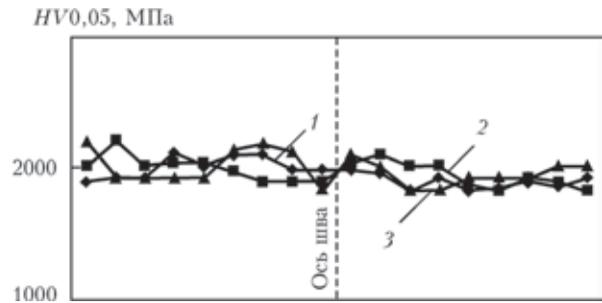


Рис. 3. Распределение микротвердости поперек сварного соединения, выполненного ЭЛС на листовом техническом титане: 1 — верх; 2 — центр; 3 — корень шва

ные характеристика на уровне или выше значений ГОСТ 23755–79 [11].

Следующим этапом исследований была оценка возможности получения равнопрочного сварного соединения листового проката технического титана ВТ1-0, упрочненного азотом до 0,1 % из газовой фазы в процессе ДШП (далее — листовой технический титан), толщиной 35 мм, выполненного электроннолучевой сваркой (ЭЛС).

Известно, что при легировании титана азотом из твердой фазы образуются нитриды различного химического состава, в частности, в процессе переплава титановой губки и последующего получения титановых сплавов. Наряду с нитридами титана могут образовываться твердые включения, обогащенные азотом. Поэтому одна из задач заключалась в оценке вероятности образования твердых включений нитрида титана в листовом техническом титане и его сварном соединении при ЭЛС. Была также изучена возможность рас-

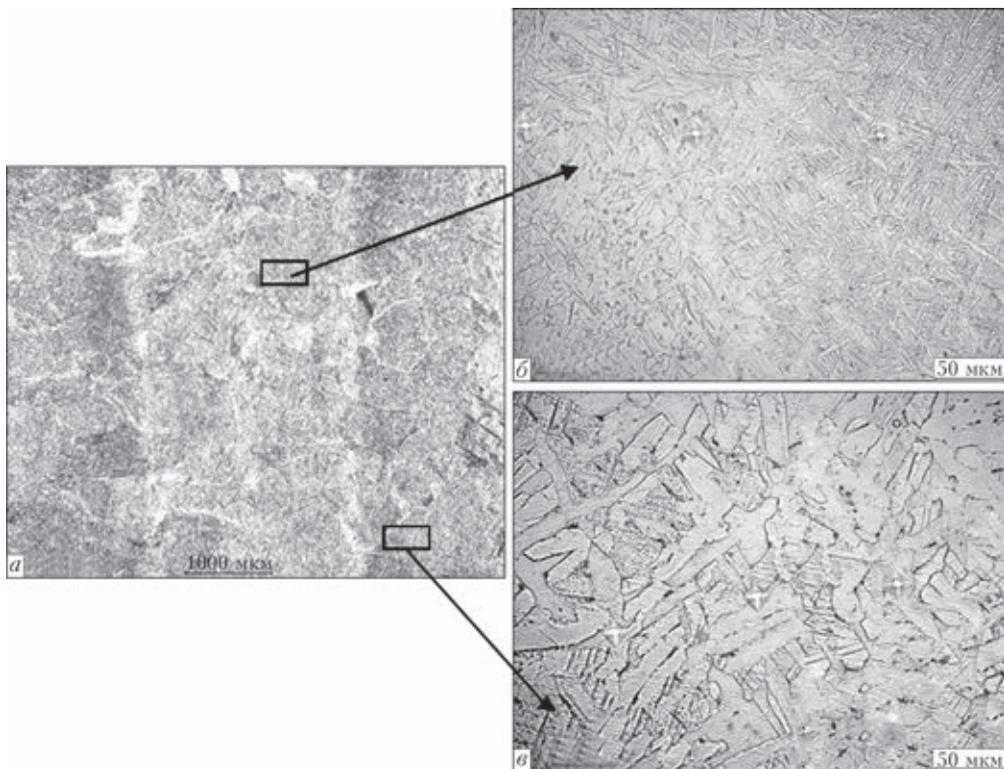


Рис. 4. Микроструктура зоны соединения (а —  $\times 25$ ), шва (б —  $\times 400$ ) и основного металла (в —  $\times 400$ )

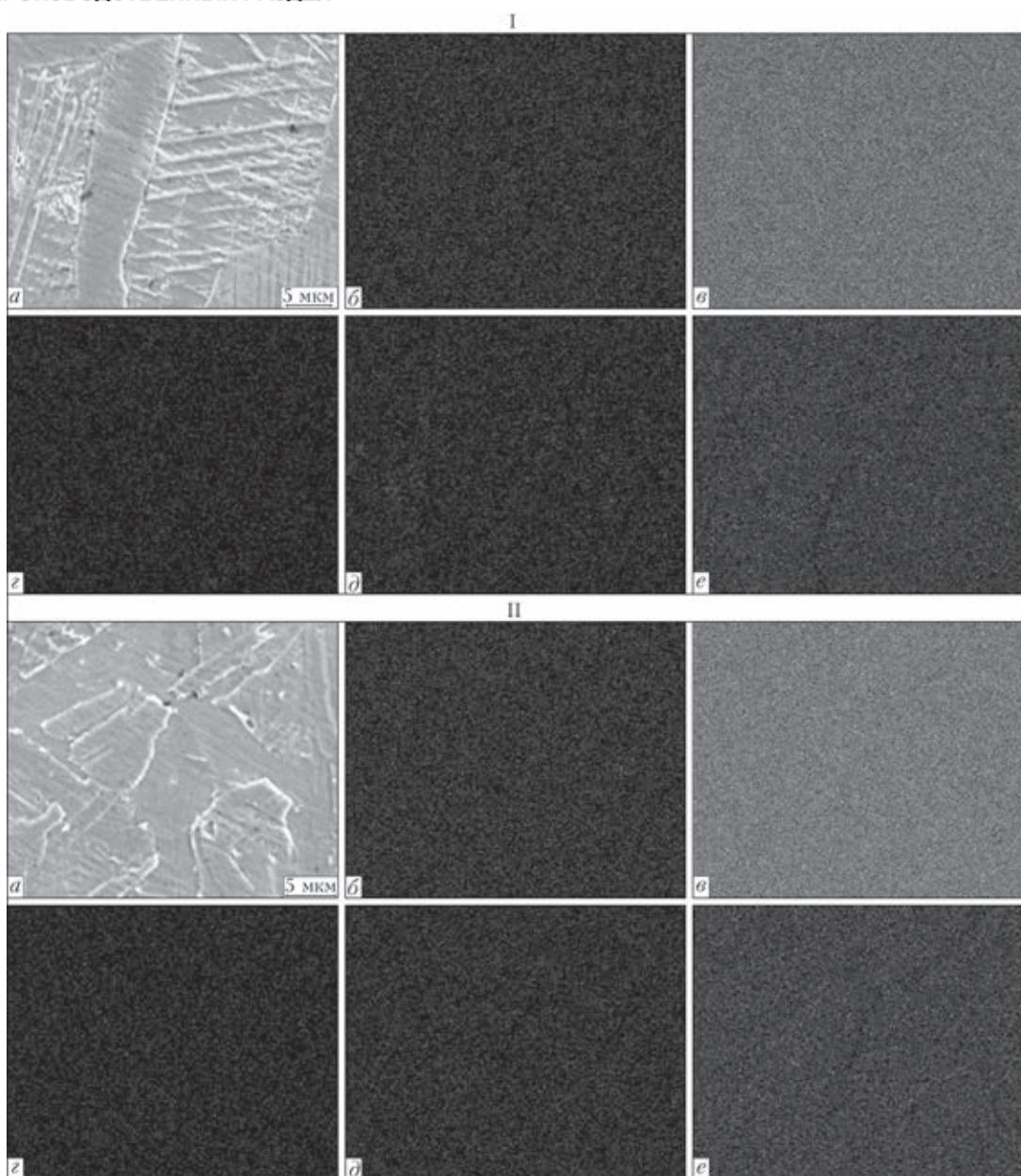


Рис. 5. Микроструктура ( $\times 2000$ ) основного металла (I, *a*), металла шва (II, *a*) и концентрационные карты распределения алюминия (I, II, *b*), титана (*в*), железа (*г*), кислорода (*д*), азота (*е*)

творения твердых частиц нитрида титана в жидком титане [12].

Были выполнены угловые и стыковые соединения листового технического титана, внешний вид которых показан на рис. 1. В обоих случаях отмечено хорошее формирование шва и отсутствие каких-либо дефектов в металле шва и околошовной зоны.

Уровень твердости по Бринеллю оценивали в продольном сечении образца. Замеры проводили при нагрузке 3000 кг шариком диаметром 10 мм. Металл шва имел  $HV\ 207\dots 217$ , основной металл  $HV\ 197\dots 207$  (рис. 2). Микротвердость измеряли на твердомере LECO M-400 при нагрузке 50 г с шагом 100 мкм в разных зонах сварного соединения. Как показали измерения (рис. 3), значения довольно равномерно распределены во всем объ-

еме сварного соединения и составляют в верхней части шва  $HV = 1830\dots 2120$ , в центре  $HV = 1830\dots 2210$  и в корне  $HV = 1830\dots 2200$  МПа.

Для исследования микроструктуры образцов сварных соединений использовали химическое травление реактивом  $HCl + HNO_3 + H_2O$  и применяли микроскоп Neophot-32. Структура зоны соединения, шва и основного металла представлена на рис. 4. Металлографические исследования\* показали, что получено качественное бездефектное сварное соединение с однородной структурой. Шов шириной около 3 мм имеет игольчатую структуру с иглами разной длины (15...40 мкм), расположенными под углом  $60^\circ$ . Основной металл

\* Работа выполнялась при участии канд. техн. наук А. Ю. Туника.

содержит более крупное зерно (50...100 мкм), основной структурной составляющей является  $\alpha'$ -фаза.

Для рентгеноспектральных исследований использовали аналитический комплекс, который состоит из сканирующего электронного микроскопа JSM-35CF (JEOL, Япония) и системы для энергодисперсионного микроанализа INCA Energy-350 («Oxford Instruments», Великобритания). Эксперименты проводили при ускоряющем напряжении 20 кВ, 200-...10000-кратном увеличении, элементный анализ выполняли в диапазоне от бора до урана.

Данные рентгеноспектрального анализа свидетельствуют о равномерном характере распределения элементов (азота, кислорода, алюминия, железа) в структуре основного металла, упрочненного азотом до 0,1 %, и металла шва, выполненного ЭЛС (рис. 5). При четко выявленном рельефе структуры (рис. 5, I, II, а) химической неоднородности по основным элементам не наблюдается. Результаты исследований подтверждают также, что при содержании в титане до 0,1 % азота твердые включения нитрида титана отсутствуют.

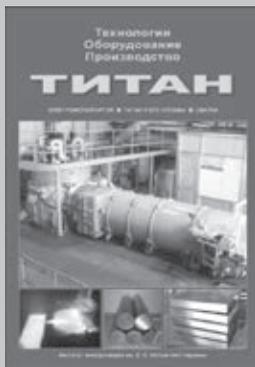
В заключение следует подчеркнуть актуальность проводимых работ по совершенствованию технологических процессов получения технического титана [13] и повышению его прочностных характеристик путем регламентированного введения примесей, в частности, элементов внедрения. Для получения равнопрочного соединения листового технического титана, упрочненного азотом до 0,1 % в процессе ДШП, толщиной 35 мм эффективно применение ЭЛС. При такой концентрации азота во всех зонах сварного соединения отсутствуют твердые включения нитрида титана. Отмечено равномерное распределение азота, алюминия, титана, железа, кислорода, формирование однородной микроструктуры и довольно равно-

мерное распределение твердости и микротвердости. Важно также, что такой упрочненный технический титан может найти широкое применение в промышленности и медицине.

1. А. с. 520784 СССР, МКП С21С5/56. Способ переплава расходуемого электрода / Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, В. И. Лакомский и др. – Заявл. 09.08.1974. Опубл. 30.05.1982; Бюл. № 20.
2. Paton B. E., Medovar B. I., Saenko V. Ya. et al. Arc-slag remelting of titanium and titanium alloys // Proc. of Intern. Symp. (USA, CA, June 29–July 2, 1992). – Vol. 3. – P. 2429–2431.
3. Дугошлаковый переплав титана и титановых сплавов / Б. И. Медовар, В. В. Шепелев, В. Я. Саенко, Ю. М. Помарин // Пробл. спец. электротехнологии. – 1992. – № 2. – С. 13–15.
4. Патон Б. Е., Медовар Б. И., Саенко В. Я. и др. Переплав губчатых титановых расходуемых электродов методами ЭШП и ДШП // Там же. – 1994. – № 3/4. – С. 7–11.
5. Патон Б. Е., Саенко В. Я., Помарин Ю. М. и др. Возможности дугошлакового переплава как одного из методов специальной электротехнологии // Специальная электротехнология: вчера, сегодня, завтра: Матер. Междунар. научно-техн. конф. (Киев, 8–9 окт. 2002 г.). – К.: Політехніка, 2002. – С. 123–137.
6. Медовар Л. Б., Саенко В. Я., Федоровский Б. Б. Дугошлаковый переплав титана и его сплавов // Сб. тр. Междунар. конф. «Титан-2007 в СНГ» (Ялта, 15–18 апр. 2007 г.). – С. 177–180.
7. Медовар Л. Б., Саенко В. Я., Рябинин В. А. и др. Совершенствование дугошлакового переплава титана и его сплавов // Титан. – 2010. – № 3. – С. 15–19.
8. Колачев Б. А., Ливанов В. А., Буханова А. А. Механические свойства титана и его сплавов. – М.: Металлургия, 1974. – 544 с.
9. ASM metals handbook. – Vol. 3. – Ohio: ASM, 1980.
10. Упрочнение титана путем легирования азотом из газовой фазы в процессе дугошлакового переплава / Б. И. Медовар, В. Я. Саенко, В. И. Кумыш, В. А. Рябинин и др. // Пробл. спец. электротехнологии. – 1994. – № 3/4. – С. 12–17.
11. Medovar B. I., Saenko V. Ya., Grigorenko G. M. et al. Arc-slag remelting of steel and alloys. – Cambridge: Intern. Sci. Publ., 1996.
12. Григоренко Г. М., Помарин Ю. М., Орловский В. Ю. и др. О растворении твердых частиц TiN в жидком титане во время плавки // Совр. электротехнология. – 2008. – № 2. – С. 49–51.
13. Александров А. В., Прудковский Б. А. Разные грани титана и его сплавов // Титан. – 2005. – № 1. – С. 64–70.

Поступила в редакцию 13.05.2014

**ТИТАН. ТЕХНОЛОГИИ. ОБОРУДОВАНИЕ. ПРОИЗВОДСТВО.** — Киев: Международная ассоциация «Сварка», 2014. — 270 с. Мягкий переплет, 200×290 мм.



Сборник включает 54 статьи, опубликованные в журналах «Современная электротехнология» и «Автоматическая сварка» за период 2011–2013 гг., по электротехнологии и сварке титана и его сплавов. Тематика статей посвящена созданию новых технологических процессов и оборудования для производства и сварки титана. Представлены обзоры по дисперсионному упрочнению титановых сплавов и по сварке сплавов алюминид титана, а также обзор мирового и региональных рынков титана.

Сборник предназначен для инженеров, технологов, конструкторов, занятых в машиностроении, энергетике, строительстве, судостроении, металлургии и других отраслях промышленного производства, связанных с обработкой и потреблением титана; полезен также преподавателям и студентам высших учебных заведений.