

## ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА СЛОЖНОЛЕГИРОВАННОГО ВЫСОКОПРОЧНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА

С. В. АХОНИН, С. Г. ГРИГОРЕНКО, В. Ю. БЕЛОУС, Т. Г. ТАРАНОВА, Р. В. СЕЛИН, Э. Л. ВРЖИЖЕВСКИЙ  
ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В работе рассмотрены особенности формирования соединения сложнолегированного высокопрочного ( $\alpha + \beta$ )-титанового сплава при электронно-лучевой сварке в вакууме. Исследования проводили на образцах сплава системы легирования Ti–Al–Mo–V–Nb–Cr–Fe–Zr, полученного методом электронно-лучевого переплава. Изучено влияния термического цикла сварки и последующей термической обработки на структурно-фазовые превращения в металле шва и зоне термического влияния сварных соединений. В металле шва и зоне термического влияния соединений формируется структура с преобладанием метастабильной  $\beta$ -фазы, что способствует снижению показателей пластичности и ударной вязкости. Для улучшения структуры и свойств сварных соединений, выполненных электронно-лучевой сваркой, необходимо проведение последующей термической обработки. Наилучшее сочетание прочности и пластичности исследуемых сварных соединений было получено после проведения печной термообработки (отжиг при  $T = 900$  °С в течение одного часа и охлаждение в печи), которая способствует получению практически однородной структуры и распаду метастабильных фаз в шве и зоне термического влияния. Библиогр. 8, табл. 2, рис. 8.

*Ключевые слова:* электронно-лучевая сварка, титановые сплавы, термическая обработка, сварное соединение, структура, механические свойства

Разработка современного конкурентоспособного оборудования, как правило, требует повышения эксплуатационных характеристик металлических конструкций и деталей. Эти требования относятся и к высокопрочным сплавам на основе титана, которые нашли широкое применение как конструкционный материал. В ведущих материаловедческих центрах США, ЕС, России и Китая проводятся интенсивные работы по модернизации существующих титановых сплавов. Кроме того, исследуется возможность создания новых сплавов с большим количеством легирующих элементов [1]. Современные двухфазные высоколегированные сплавы на основе титана характеризуются высокой удельной прочностью. В настоящее время всё больше внимания уделяется вопросам создания сварных конструкций и узлов из сплавов титана с временным сопротивлением  $\sigma_b \geq 1100$  МПа [2]. Как конструкционные материалы широко применяются сплавы со структурой ( $\alpha + \beta$ ), которые отличаются лучшим сочетанием технологических и механических свойств — более прочны, чем однофазные, хорошо куются и штампуются, поддаются термической обработке и имеют удовлетворительную свариваемость. Сварные конструкции из этих сплавов применяются в авиационной технике, ракетостроении, атомной технике, судостроении и химическом машиностроении [3, 4]. Свариваемость двухфазных высоколегированных сплавов титана, применение которых может дать наибольшее снижение массы конструкции, значительно хуже, чем низколегированных, и по этому

показателю они уступают даже некоторым высокопрочным сталям. Электронно-лучевая сварка (ЭЛС) широко применяется при производстве конструкций из высоколегированных титановых сплавов, в том числе и из термически упрочняемых двухфазных. Большие скорости охлаждения при ЭЛС и повышенная чувствительность сложнолегированных титановых сплавов к термическому циклу сварки обуславливают в ряде случаев пониженную пластичность сварного соединения [5]. Поэтому двухфазные титановые сплавы после сварки требуют обязательной термообработки [6]. При разработке новых сплавов существенное внимание уделяется возможности получения сварных соединений с прочностью не менее 0,9...0,95 прочности основного металла.

Целью работы является изучение влияния термического цикла сварки и последующей термической обработки на структурно-фазовые превращения в металле шва и зоне термического влияния (ЗТВ) сварных соединений сложнолегированного высокопрочного титанового сплава, полученных ЭЛС.

**Материалы и методы исследования.** В качестве материала для исследования использовали пластины толщиной 8 мм, полученные из слитков опытного титанового сплава [7]. После выплавки слитки подвергались термомеханической обработке. Подготовленные для исследований образцы имели следующий состав, мас. %: (основа) Ti–6,5Al–3,0 Mo–2,5V–4Nb–1Cr–1Fe–2,5Zr. Механические свойства исследуемого сплава приведены в табл. 1.

**Таблица 1. Механические свойства сложнолегированного высокопрочного титанового сплава толщиной 8 мм**

Состояние металла	Временное сопротивление разрыву $\sigma_B$ , МПа	Предел текучести $\sigma_T$ , МПа	Относительное удлинение $\delta_s$ , %	Относительное сужение $\psi$ , %	Ударная вязкость $KCV$ Дж/см <sup>2</sup>
После проката	1259,9	1179,5	1,7	6,2	5,0
После отжига 850 °С – 1 ч	1214,9	1089,2	10,0	18,5	9,0
После отжига 900 °С – 1 ч	1186,0	1123,6	13,3	19,0	13,5



Рис. 1. Общий вид сварного соединения сложнолегированного высокопрочного титанового сплава, полученного ЭЛС: *а* — лицевая, *б* — корневая сторона

ЭЛС проводили в установке УЛ-144, укомплектованной источником питания ЭЛА 60/60. Сварку проводили на следующем режиме: ускоряющее напряжение 60 кВ; ток луча 120 мА; диаметр круговой развертки 2 мм; скорость сварки 25 м/ч.

Одним из преимуществ технологии ЭЛС применительно к титану и сплавам на его основе помимо обеспечения надежной защиты сварных соединений является возможность осуществления локального подогрева и последующей термической обработки в вакуумной камере [8]. Предварительный подогрев сварных соединений – достаточно эффективный технологический прием, который используют при сварке для предупреждения образования так называемых холодных

трещин. Но поскольку исследуемый сплав не склонен к образованию холодных трещин, предварительный подогрев свариваемых поверхностей не проводили.

На рис. 1 представлен общий вид сварного соединения, полученного ЭЛС.

Для проведения локальной термической обработки (ЛТО) после сварки соединение нагревали электронным пучком, развернутым в прямоугольный растр. Режим термообработки выбирали с учетом мощности пучка и ширины нагреваемой области (т. е. ширины растра). Мощность электронного луча в процессе ЛТО составляла около 3 кВт и подвергалась корректировке для поддержания температуры в зоне обработки на уровне 850 °С. Время обработки составляло 5 мин. На рис. 2 приведена схема сканирования электронного луча при ЛТО образцов из титановых сплавов.

Отжиг (ТО) сварных соединений проводили в печи при температуре 900 °С в течение одного часа.

Резку образцов проводили на установке «Isomet» фирмы «BUENLER» с помощью алмазных дисков. Химический состав опытных сплавов определяли спектральным и химическим анализами. Металлографические исследования и фотосъемку проводили на световом микроскопе Neophot-32, оснащенный ПК, цифровой фотокамерой OLYMPUS и системой архивирования. Твердость образцов определяли на твердометре М-400 фирмы «LECO» (США) при нагрузке 100 г и 1 кг. Исследование поверхности изломов основного металла и сварных соединений проводили на многофункциональном современном приборе с высокими техническими характеристиками «Оже-микроскоп с полевым эмиссионным катодом JAMP 9500F» (JEOL Ltd, Япония). Для определения ме-

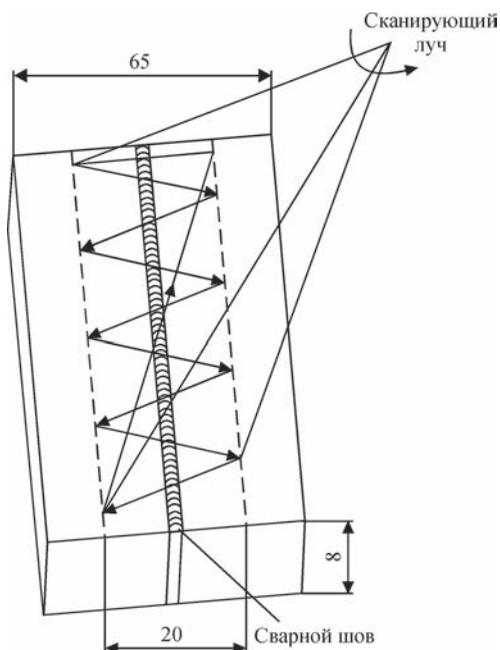


Рис. 2. Схема сканирования сварного соединения при локальной электронно-лучевой термообработке

ханических свойств сварных соединений были проведены испытания на статическое растяжение и ударный изгиб (согласно ГОСТ 1497–84).

Исследования проводили на следующих образцах:

Образец № 1 — сварное соединение сложнолегированного высокопрочного титанового сплава, полученное ЭЛС;

Образец № 2 — сварное соединение сложнолегированного высокопрочного титанового сплава, полученное ЭЛС с последующей ЛТО (850 °С, 5 мин);

Образец № 3 — сварное соединение сложнолегированного высокопрочного титанового сплава, полученное ЭЛС с последующей ТО (отжиг в печи при 900 °С, 1 ч).

**Результаты исследований.** Локальность и интенсивность процесса ЭЛС обеспечивают получение глубокого узкого шва и малой ЗТВ.

В результате металлографических исследований образца № 1 (рис. 3) в металле шва сварного соединения обнаружены литые кристаллиты, дезориентированные в центре, а по краям ориентированные в направлении отвода тепла, с четко выраженной дендритной структурой. Микроструктура металла шва практически однофазная и состоит из  $\beta$ -фазы. В отдельных зернах и по их границам наблюдается частичный распад  $\beta$ -фазы с выделениями мелких частиц  $\alpha$ -фазы. Твердость металла шва сварного соединения составляет 2790...3210 МПа. Ширина шва 3...4 мм. В ЗТВ, возле шва, структура состоит из больших полиэдрических зерен  $\beta$ -фазы с выде-

лениями мелкоигльчатой  $\alpha$ -фазы в теле зерна. Также на границе «шов – ЗТВ» наблюдаются отдельные зерна с субструктурой. По мере приближения к основному металлу размер зерен  $\beta$ -фазы уменьшается. Твердость металла ЗТВ составляет 2690...3300 МПа, ширина ЗТВ примерно 2...3 мм. Структура основного металла состоит из пакетов параллельных пластин ( $\alpha+\beta$ )-фазы. Размер зерна 0,088...0,125 мм, твердость основного металла составляет 3340...3430 МПа.

Фрактографические исследования поверхности разрушения образца после механических испытаний (рис. 4) показали, что рельеф поверхности слабо выраженный, механизм разрушения смешанного типа. Механизм хрупкого разрушения — квазискол 65 %, вязкого — ямочное строение 35 %.

Металлографические исследования образца № 2 (рис. 5) показали, что после ЛТО повышается структурная однородность сварного соединения. Шов и линия сплавления выражены не так явно, как после сварки. Шов представляет собой смесь вытянутых и полиэдрических  $\beta$ -зерен с дезориентированным выделением пластинчатой  $\alpha$ -фазы. Твердость металла шва составляет 3220...3450 МПа. ЗТВ состоит из крупных полиэдрических  $\beta$ -зерен с выделениями дисперсной  $\alpha$ -фазы. Твердость составляет 3250...3450 МПа. Структура основного металла представлена более мелкими полиэдрическими зернами с пластинчатой ( $\alpha + \beta$ )-фазой и с твердостью от 3420 до 3600 МПа

Фрактографические исследования образца показали, что поверхность разрушения имеет слож-

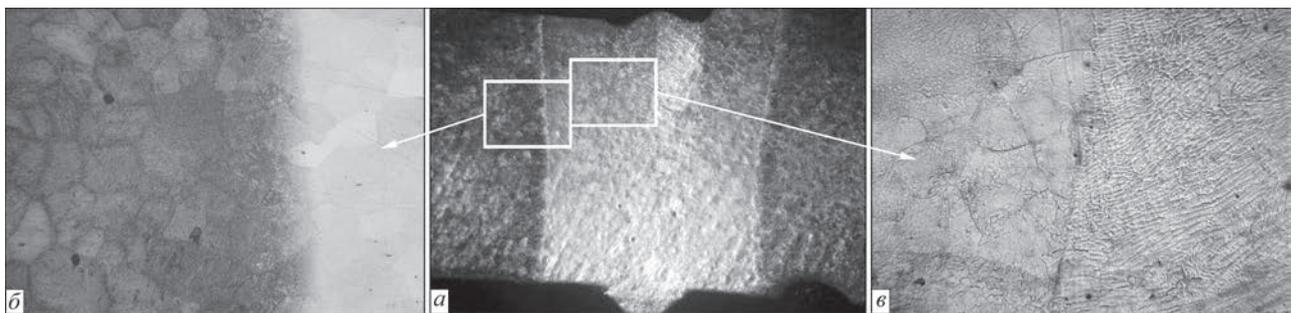


Рис. 3. Структура сварного соединения образца № 1: *a* — общий вид ( $\times 10$ ); *б* — микроструктура ОМ ( $\times 50$ ); *в* — микроструктура шва и ЗТВ ( $\times 100$ )

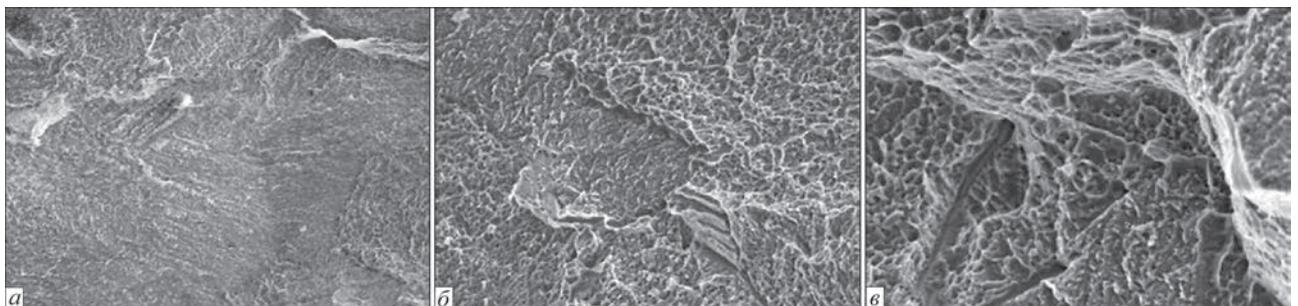


Рис. 4. Фрагменты поверхности разрушения образца № 1: *a* — межзеренное ( $\times 300$ ); *б* — внутризеренное в сочетании с отрывом ( $\times 500$ ); *в* — ямочного характера с отрывом и вторичными трещинами ( $\times 1000$ )

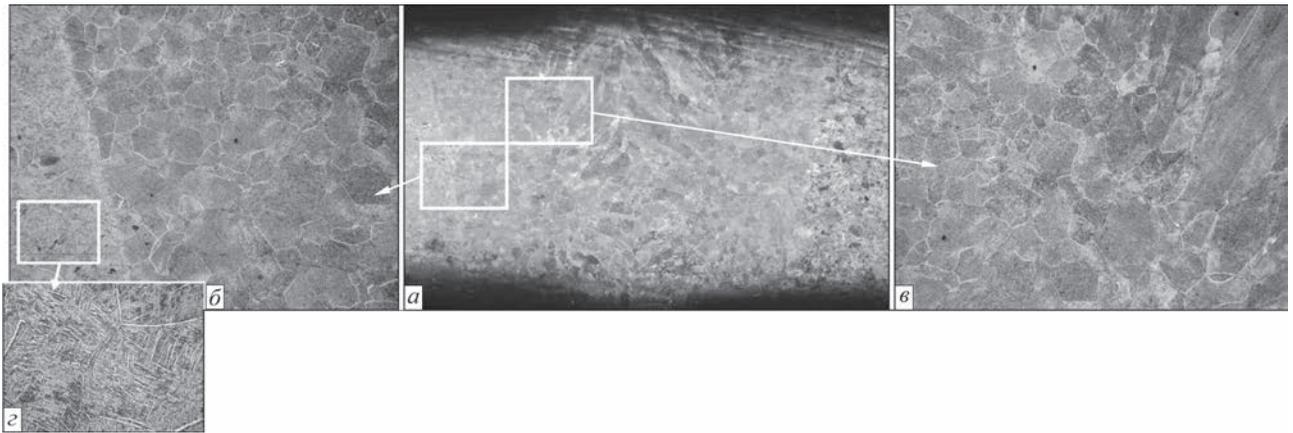


Рис. 5. Структура сварного соединения образца № 2: *a* — общий вид ( $\times 10$ ); *б* — микроструктура ЗТВ — ОМ ( $\times 50$ ); *в* — микроструктура шва и ЗТВ ( $\times 50$ ); *г* — микроструктура ОМ ( $\times 500$ )

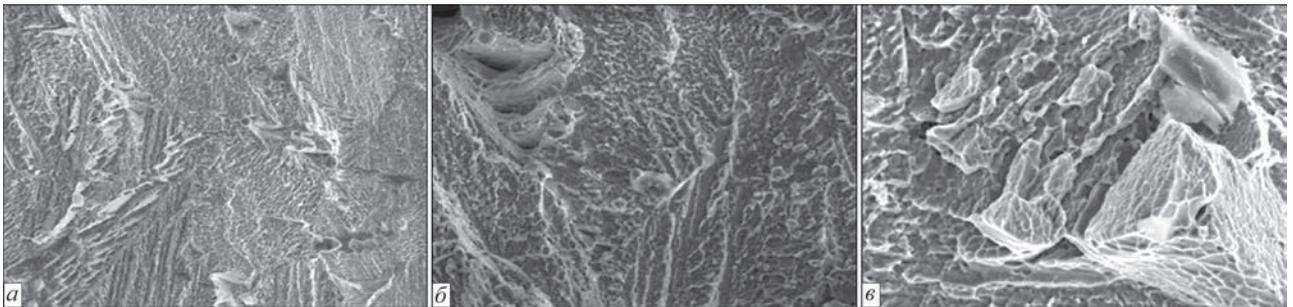


Рис. 6. Фрагменты поверхности разрушения образца № 2: *a* — межзеренное ( $\times 300$ ); *б* — внутризеренное в сочетании с отрывом ( $\times 500$ ); *в* — ячюго характера с отрывом ( $\times 1000$ )

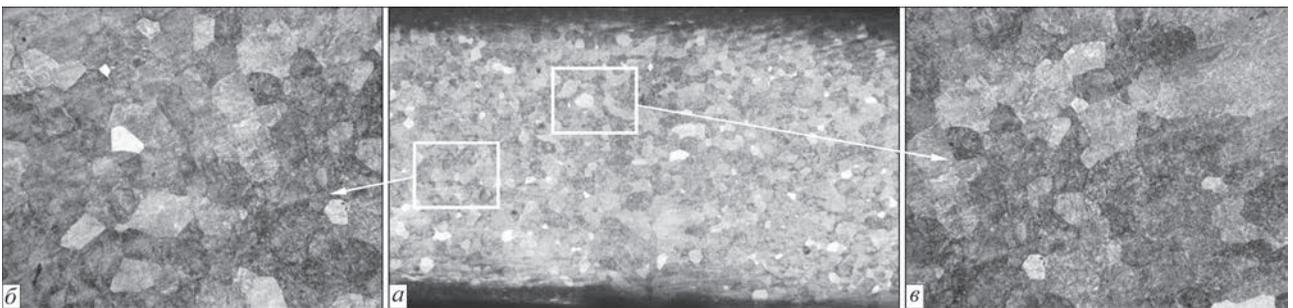


Рис. 7. Структура сварного соединения образца № 3: *a* — общий вид ( $\times 10$ ); *б* — микроструктура ЗТВ — ОМ ( $\times 50$ ); *в* — шва и ЗТВ ( $\times 50$ )

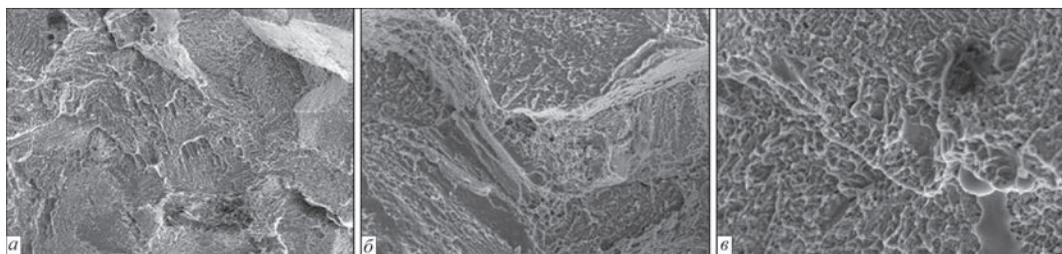


Рис. 8. Фрагменты поверхности разрушения образца № 3: *a* — межзеренное ( $\times 300$ ); *б* — внутризеренное в сочетании с отрывом ( $\times 500$ ); *в* — ячюго характера ( $\times 1000$ )

ный микрорельеф (рис. 6). Трещина проходит по границам раздела между матрицей  $\beta$ -фазы и дисперсной игольчатой  $\alpha$ -фазой. Поверхность разрушения содержит фасетки скола на фоне участков межзеренного разрушения (участки отрыва). Поверхность разрушения содержит много возвышенностей в виде ступенек.

Металлографические исследования образца № 3 (рис. 7) показали, что после печной термообработки структура исследуемого образца становится практически однородной, границы между швом, ЗТВ и основным металлом не выявляются. Структура по всей исследуемой поверхности разнотеренная с пластинами  $(\alpha+\beta)$ -фазы разной вели-

Таблица 2. Механические свойства сварных соединений сложнолегированного высокопрочного титанового сплава, полученных ЭЛС

Номер образца	Состояние образца	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_r$ , МПа	$\delta_s$ , %	$\psi$ , %	KCV, Дж/см <sup>2</sup>	
						шов	ЗТВ
1	ЭЛС, после сварки	1415	1380	2,0	6,6	7,2	6,0
2	ЭЛС, ЛТО 850° – 5 мин	1258	1216	4,3	9,2	7,3	14,4
3	ЭЛС, ТО 900° – 1 ч	1131	1089	12,0	24,5	12,4	12,7

чины. Твердость (от центра шва в основной металл) составляет 3340...3440 МПа.

Фрактографические исследования показали, что разрушение образцов носит смешанный характер (рис. 8). Излом содержит 30 % хрупкой составляющей и 70 % — вязкой. Трещина распространялась строго перпендикулярно прикладываемой нагрузке. Хрупкое разрушение происходит по механизму внутризеренного скола, а вязкое — в результате слияния микропор. Наблюдаемые фасетки скола разделены участками отрыва. Отрыв происходит в тех случаях, когда пластичность материала достаточно высокая.

В табл. 2 приведены результаты механических испытаний исследуемых образцов.

Проанализировав табл. 3 можно сделать вывод, что термическая обработка, проведенная после сварки, повышает показатели пластичности и ударной вязкости сварного соединения сложнолегированного высокопрочного титанового сплава. Особенно эффективна печная обработка (отжиг при температуре 900 °С в течение одного часа), которая приводит к значительному повышению пластичности и ударной вязкости в сочетании с небольшим снижением прочностных характеристик.

## Выводы

1. Исследованы структура и свойства сварных соединений сложнолегированного высокопрочного ( $\alpha + \beta$ )-титанового сплава, полученных ЭЛС. Установлено, что сплав имеет удовлетворительную свариваемость, но в металле шва и ЗТВ структура неоднородная и наблюдаются метастабильные фазы, что способствует снижению показателей прочности и пластичности.

2. Термическая обработка сварных соединений сложнолегированного высокопрочного ( $\alpha + \beta$ )-ти-

танового сплава, полученных ЭЛС, повышает структурную однородность, снижает вероятность образования в них трещин и способствует улучшению показателей механических характеристик.

3. После ЛТО сварных соединений показатели вязкости повышаются незначительно, что объясняется неполным распадом метастабильных структур в результате непродолжительного теплового воздействия (нагрев при  $T = 850$  °С на протяжении 5 мин).

4. Наилучшее сочетание прочности и пластичности исследуемых сварных соединений было получено после проведения печной термообработки (отжиг при  $T = 900$  °С в течение одного часа и охлаждение в печи). Такая обработка способствовала получению практически однородной структуры, распаду метастабильных фаз в шве и ЗТВ, что привело к значительному повышению показателей пластичности и ударной вязкости.

- Хорев А. И. Теория и практика создания титановых сплавов для перспективных конструкций / А. И. Хорев // Технология машиностроения. – 2007. – № 12. – С. 5–13.
- Каблов Е. Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 г. / Е. Н. Каблов // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – № 5. – С. 7–17.
- Грабин В. Ф. Металловедение сварки плавлением / В. Ф. Грабин. – К.: Наукова думка, 1982. – 416 с.
- Шоршоров М. Х. Металловедение сварки стали и сплавов титана. / М. Х. Шоршоров. – М.: Наука, 1965. – 337 с.
- Металлургия и технология сварки титана и его сплавов / С. М. Гуревич, В. Н. Замков, В. Е. Блашук [и др.]. – 2-е изд., доп. и перераб. – К.: Наукова думка, 1986. – 240 с.
- Хорев М. А. Термическая обработка сварных соединений сплавов титана ОТ4 и ВТ20 / М. А. Хорев, Ю. В. Гусев, Н. К. Грибова // Автоматическая сварка. – 1983. – № 7. – С. 19–23.
- Электронно-лучевая плавка в литейном производстве; под ред. С. В. Ладохина. – К.: Сталь, 2007. – 626 с.
- Электронно-лучевая сварка / О. К. Назаренко, А. А. Кайдалов, С. Н. Ковбасенко [и др.] // Под ред. Б. Е. Патона. – К.: Наукова думка, 1987. – 256 с.

Поступила в редакцию 26.04.2016

15 мая 2006 г. открыта скульптура «Cloud Gate» (фотография на первой странице журнала), расположенная в деловом квартале Чикаго, США. Автор — британский художник индийского происхождения Аниш Капур. Скульптура состоит из 168 пластин нержавеющей стали, сваренных вместе, отполированных до такой степени, что ее внешняя поверхность не имеет видимых швов. Размеры скульптуры — 10 (высота), 20 (длина) и 13 (ширина) метров, масса 100 тонн. Сварщики использовали гибридную лазерно-дуговую сварку.

