



УДК 621.791.947.2

# ВЛИЯНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПРИ ЭЛС ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ С СИЛИЦИДНЫМ УПРОЧНЕНИЕМ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛА ШВОВ

Э. Л. ВРЖИЖЕВСКИЙ, В. К. САБОКАРЬ, С. В. АХОНИН, И. К. ПЕТРИЧЕНКО  
 ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11, E-mail: office@paton.kiev.ua

К недостаткам электронно-лучевой сварки сложнолегированных титановых сплавов относятся высокие скорости нагрева и охлаждения металла шва, приводящие к снижению пластических свойств. Цель настоящей работы состояла в определении влияния предварительного подогрева и локальной термической обработки электронным лучом на предотвращение образования дефектов в виде трещин и в улучшении пластических свойств сварных соединений жаропрочных титановых сплавов. Задачей исследований являлось определение температуры предварительного подогрева для предотвращения негативного влияния высокого градиента температур, характерного для электронно-лучевой сварки. В этом случае обеспечивается более плавный перепад температур при сварке, что препятствует образованию трещин. После сварки соединения подвергали локальному отжигу при температуре 900 °С в течение 10 мин. Все сварные соединения подвергали рентгенографическому контролю и металлографическим исследованиям. Выявлено, что, варьируя параметрами нагрева при локальной термообработке электронным лучом, можно влиять на скорость протекания фазовых и структурных превращений в титановых сплавах с силицидным упрочнением и тем самым менять структуру, а следовательно, и свойства сварных соединений, что позволяет сохранять сварные конструкции продолжительное время до проведения общей печной обработки. Предложенный подход может быть использован при производстве осевых компрессоров для газотурбинных двигателей и энергетических установок. Библиогр. 6, табл. 1, рис. 7.

*Ключевые слова:* электронно-лучевая сварка, сложнолегированные титановые сплавы, металл шва, локальная термическая обработка, механические свойства, перспективы применения

Конструкционными материалами при изготовлении деталей авиационных двигателей являются жаропрочные титановые сплавы. С середины 1970-х годов широкое распространение получила электронно-лучевая сварка (ЭЛС) деталей из этих сплавов, позволяющая соединять их в узкий зазор с минимальным короблением, что необходимо при сварке осевых компрессоров. К недостаткам ЭЛС жаропрочных сложнолегированных титановых сплавов относятся высокие скорости нагрева и охлаждения металла шва и зоны термического влияния, приводящие к резкому снижению пластических свойств [1], что может обуславливать образование дефектов в виде поперечных трещин при остывании после сварки (рис. 1). Поэтому при сварке подобных конструкций целесообразно применение локальной термической обработки (ЛТО) непосредственно в камере электронно-лучевой сварочной установки [2]. Данная технология позволяет предотвратить образование трещин и улучшить пластические свойства металла сварного соединения применительно к изделиям небольшой массы.

В настоящей работе изучено влияние ЛТО электронным лучом на механические свойства металла швов экспериментальных титановых

сплавов с силицидным упрочнением состава Ti-6,08Al-2,18Sn-3,88Zr-0,39Mo-1,14V-0,65Si (сплав 1) и Ti-5,5Al-3,02Sn-4,58Zr-0,1Mo-0,8Nb-0,59V-0,6Si (сплав 2). Выплавку слитков осуществляли на гарнисажной электронно-лучевой установке ИСВ-004 [3]. После прокатки полученные сплавы отжигали по режимам, рекомендуемым для псевдо- $\alpha$ -сплавов [4]. Эксперименты проводили на плоских образцах размером 150×70×13 мм. Сварку электронным лучом осуществляли за один проход со сквозным проплавлением на установке УЛ 144, оснащенной энергоблоком ЭЛА 60/60. При ЛТО ширину прогреваемого участка определяли

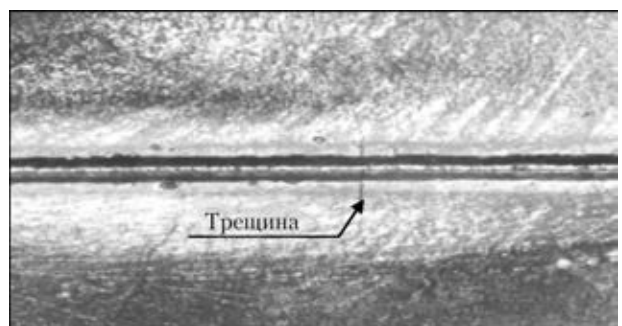


Рис. 1. Внешний вид шва, выполненного ЭЛС, с характерным дефектом в виде трещины

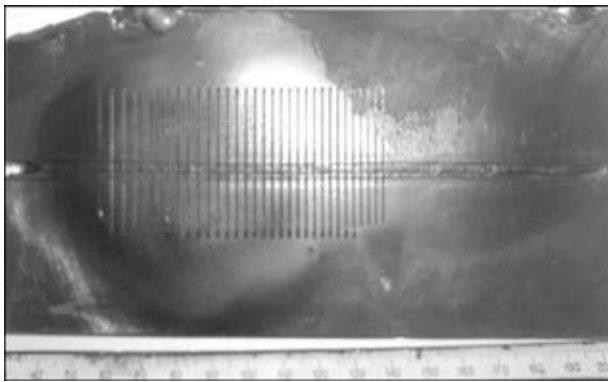


Рис. 2. Внешний вид прямоугольной развертки, используемой для ЛТО

таким образом, чтобы она перекрывала шов и зону термического влияния. На рис. 2 приведен внешний вид прямоугольной развертки в сфокусированном состоянии. При ЛТО силу тока луча, фокусировку, длительность воздействия и частоту сканирования луча выбирали из условия обеспечения на обрабатываемом участке температуры на уровне 750...950 °С.

Контроль температуры осуществляли с помощью термопар, прикрепленных с корневой стороны шва (рис. 3). Подобная методика опубликована в работе [5].

Как упоминалось выше, высокая скорость нагрева и охлаждения, характерная для ЭЛС, является одним из ее недостатков. Для предотвраще-

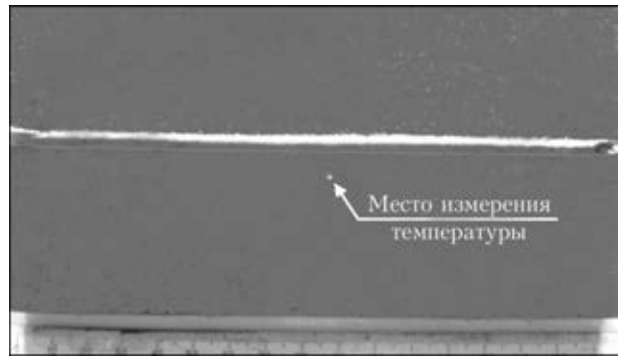


Рис. 3. Место установки термопары для измерения температуры при ЛТО

ния этого негативного влияния изучали воздействие предварительного подогрева на механические свойства металла швов опытных титановых сплавов 1 и 2. Такой метод при ЭЛС титановых сплавов ранее не применялся в отличие от последующей ЛТО электронным лучом [6].

Температуру предварительного подогрева выбирали из условия обеспечения снижения уровня деформаций свариваемых образцов. Нами были опробованы три температуры предварительного подогрева: 200, 300 и 400 °С, которые обеспечивали более плавный перепад температур при сварке. После каждой сварки с предварительным подогревом проводили механические испытания сварных соединений. Данные испытаний сведены в таблице. В результате проведенных испытаний

**Механические свойства металла шва титановых сплавов с силицидным упрочнением\***

Материал	Температура предварительного подогрева, °С, с выдержкой 5 мин	Температура (°С) и продолжительность (мин) ЛТО	Предел текучести, МПа	Временное сопротивление, МПа	Ударная вязкость, Дж/см <sup>2</sup>	Примечания
Сплав 1	—	—	1106,4	1208,2	9,05	Основной металл
	Без т/о	—	—	1309,7	—	Хрупкое разрушение
	200	—	—	1187,6	5,40	—
	200	900, 10	810,5	1182,0	5,28	—
	300	—	—	1167,7	5,10	—
	300	900, 10	743,3	1088,9	4,97	—
	400	—	—	1192,0	3,88	—
	400	900, 10	789,8	1132,9	3,35	—
Сплав 2	—	—	1136	1273,6	10,4	Основной металл
	Без т/о	—	—	1190,6	—	Хрупкое разрушение
	200	—	—	1140,1	4,91	—
	200	900, 10	1024,1	1042,9	4,40	—
	300	—	—	1167,8	3,28	—
	300	900, 10	1010,0	1167,8	3,16	—
	400	—	—	1040,8	3,13	—
	400	900, 10	1006,1	1168,0	3,48	—

\* Приведены средние значения после испытания трех образцов.



Рис. 4. Макрошлиф сварного соединения сплава 1, выполненный ЭЛС с предварительным подогревом 200 °С



Рис. 5. Макрошлиф сварного соединения сплава 1, выполненный ЭЛС с предварительным подогревом 200 °С и последующей ЛТО

определили, что оптимальная температура предварительного подогрева титановых сплавов 1 и 2 составляет 200 °С (рис. 4). Дальнейшее повышение температур предварительного подогрева до 300 и 400 °С приводит к снижению пластичности сварных соединений (см. таблицу).

После сварки соединений титановых сплавов 1 и 2 провели локальный отжиг при температуре 900 °С в течение 10 мин (рис. 5). Макроструктура сварного соединения после ЛТО не изменилась. Все сварные соединения были подвергнуты рентгенографическому контролю и металлографическим исследованиям. Трещин в сварных соедине-

ниях обнаружено не было, так как ЛТО способствовала снятию сварочных напряжений, являющихся основной причиной образования трещин. Как отмечалось в работе [2], варьируя параметрами нагрева при ЛТО электронным лучом, можно не только устранить сварочные напряжения, но и влиять на скорость протекания фазовых и структурных превращений в титановых сплавах и тем самым менять в благоприятном направлении структуру и свойства сварных соединений и обеспечивать их бездефектность.

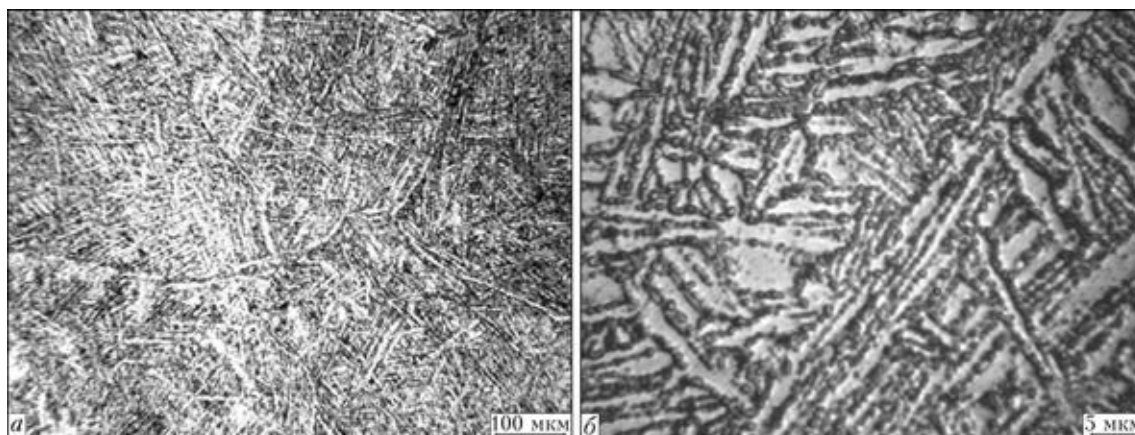


Рис. 6. Микроструктуры основного металла сплава 1

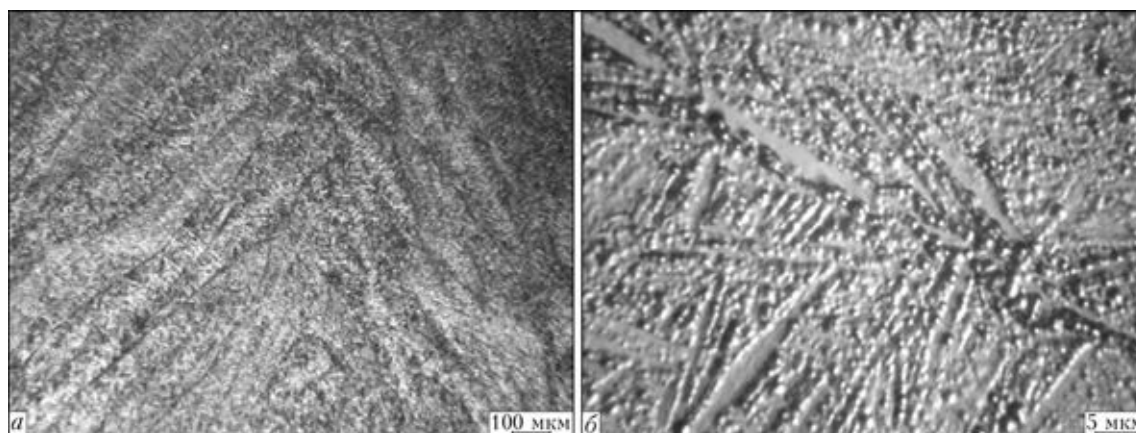


Рис. 7. Микроструктуры металла шва сплава 1 после ЭЛС с предварительным подогревом при 200 °С и последующей ЛТО



Технология сварки с последующей ЛТО позволяет предотвратить растрескивание сварных соединений до проведения общей печной обработки.

Исследуемый сплав 1 относится к группе псевдо- $\alpha$ -сплавов титана, коэффициент стабилизации  $\beta$ -фазы ( $K_\beta$ ) которого составляет 0,1. В состоянии после прокатки сплав имеет пластинчатую структуру (рис. 6, а), в которой частицы силицидов располагаются относительно равномерно в пределах первичных  $\beta$ -зерен как по границам, так и в объеме  $\alpha'$ -пластин. Отжиг стимулирует процессы диффузии, результатом которого является концентрация силицидов на границах  $\alpha$ -пластин (рис. 6, б).

Микроструктуры сварного соединения сплава 1 показаны на рис. 7. Металл шва состоит из направленных в сторону теплоотвода первичных  $\beta$ -зерен с пластинчатой  $\alpha'$ -фазой в объеме зерна. В верхней части сварного шва зерна растут с наклоном  $45^\circ$  к оси шва (рис. 7, а), в середине зерна сростаются под углом около  $180^\circ$ . После сварки частицы силицидов локализуются по границам как первичных  $\beta$ -зерен, так и в объеме  $\alpha$ -пластин. После отжига частицы силицидов главным образом расположены на границах  $\alpha$ -пластин (рис. 7, б).

Следует отметить, что микроструктуры сварных соединений сплавов 1 и 2 очень похожи, независимо от разницы в их химическом составе. Кро-

ме того, в этих двух сплавах приблизительно одинаковое содержание кремния.

Таким образом, проведенные исследования показали, что ЭЛС титановых сплавов с силицидным упрочнением с предварительным подогревом и последующей ЛТО предотвращает растрескивание сварных соединений в процессе остывания после сварки и обеспечивает удовлетворительные пластические свойства. Предложенная методика обеспечивает бездефектное формирование сварных соединений до проведения соответствующей печной обработки.

1. *Металлургия* и технология сварки титана и его сплавов / С. М. Гуревич, В. Н. Замков, В. Е. Блащук и др. — 2-е изд. доп. и перераб. — Киев: Наук. думка, 1986. — 74 с.
2. Лясоцкая В. С. Термическая обработка сварных соединений титановых сплавов. — М.: Экомет, 2003. — С. 261–262.
3. *Получение* сложнолегированных титановых сплавов методом электронно-лучевой гарнисажной плавки / Н. И. Левицкий, Е. А. Матвиец, Т. В. Лапшук и др. // *Металл и литье Украины*. — 2012. — № 4. — С. 6–9.
4. Ильин А. А., Колачев Б. А., Полькин И. С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства: Справочник. — М.: ВИЛС-МАТИ, 2009. — 479 с.
5. Лысенков Ю. Т., Власов Г. А., Овчинников В. В. Повышение свойств сварных соединений сплава ВТ20 путем местной термической обработки электронным лучом // *Свароч. пр-во*. — 1980. — № 4. — С. 7–8.
6. *Улучшение* свойств сварных соединений сплава ВТ9 путем локальной термической обработки электронным лучом / В. С. Лясоцкая, Ю. Т. Лысенков, И. М. Бирюков и др. // Там же. — 1981. — № 11. — С. 19–20.

Поступила в редакцию 18.10.2012



## X Международный конкурс сварщиков «Золотой кубок Бенардоса»

12-16 августа 2013 г.

Южный Одесской обл. (Украина)

На конкурс приглашаются сварщики из Украины и других стран, имеющие опыт работы.

Конкурс будет проходить в следующих номинациях:

- ручная дуговая сварка покрытым электродом
- дуговая сварка металлическим плавящимся электродом в активных газах
- дуговая сварка вольфрамовым электродом в инертных газах
- газовая сварка

Победители и призеры конкурса в личном и командном зачетах награждаются:

памятными кубками Бенардоса  
дипломами Общества сварщиков Украины  
ценными подарками и денежными премиями  
международными сертификатами сварщика

Организаторы конкурса:

Общество сварщиков Украины  
Одесское областное Общество сварщиков Украины  
Одесский припортовый завод

Полная информация о конкурсе представлена на сайтах: [www.tzu.key.ua](http://www.tzu.key.ua) и [www.tzu.od.ua](http://www.tzu.od.ua)