



ТЕХНИКА РЕМОНТА ЛОПАТОК ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТЗ-1 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛС

В. И. ЗАГОРНИКОВ, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрена техника ремонта титановых лопаток сложного профиля толщиной 1...2 мм в месте соединения способом ЭЛС. Разработана программа высокопроизводительных режимов сварки (до 50 мм/с), позволяющая получать качественный металл шва. Обоснован отказ от проведения термообработки вне вакуумной сварочной камеры на восстанавливаемых с помощью ЭЛС титановых лопатках с целью получения их требуемого качества.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, титановый сплав, малые толщины, техника ремонта, высокая производительность, режимы сварки, металлографические исследования

Известен положительный опыт применения электронно-лучевой сварки (ЭЛС) для восстановления рабочих лопаток паровых турбин [1, 2]. Для лопаток компрессоров реактивных двигателей, изготавливаемых из жаропрочных титановых сплавов, требуется высокая точность сопряжения свариваемых встык деталей при минимальном короблении после сварки. Способ ЭЛС удовлетворяет всем этим требованиям и отличается рядом технологических особенностей, которые делают его незаменимым при изготовлении таких изделий [3–6]. Минимальные тепловложения и деформации обеспечивают сохранение исходной геометрии восстанавливаемых тонкостенных лопаток при удовлетворительном качестве шва.

В настоящей работе изложена техника ремонта рабочих лопаток из титанового сплава ВТЗ-1 турбин газоперекачивающих станций. Выбор способа ЭЛС обусловлен требованиями массовой эффективности и повышенной эксплуатационной надежности таких деталей. Опыт применения ЭЛС для такого типа изделий малой толщины в отечественной промышленности весьма ограничен, поэтому необходимо проведение комплекса исследований для выявления условий качественного ремонта сложнопрофильных лопаток из титановых сплавов. Следует отметить, что накоплен положительный опыт применения ЭЛС толстостенных (до 20 мм) кованных заготовок из сплава ВТЗ-1 [7]. Технологические особенности получения ЭЛС сварных соединений толстостенных (100...160 мм) титановых сплавов, связанные с неоднородностью швов по толщине изделий, рассмотрены в работе [8].

Наша работа касается выполнения ЭЛС качественных швов на тонкостенной (1...2 мм) сложнопрофильной детали при значительной (≥ 50 мм/с)

скорости сварки без термообработки вне вакуумной камеры и применения присадочного материала. При этом необходимо было выполнять швы небольшой ширины, соизмеримой с толщиной свариваемой детали ($\delta \leq 1$ мм). Предполагается отсутствие недопустимых подрезов с лицевой и обратной стороны шва. Для обеспечения равнопрочности детали (лопатки) по толщине форма стенок шва в поперечном сечении должна приближаться к параллельной.

При восстановлении лопаток отрезается их дефектная часть, а затем выполняется приварка вновь изготовленной части «пера» из того же материала, что и лопатка. При этом сварной шов на лопатке располагается в области минимальных вибрационных нагрузок. Толщина лопатки может быть восстановлена путем электронно-лучевого напыления металла того же химического состава, что и материал лопатки.

ЭЛС осуществляли вертикальным пучком в нижнем положении электронной пушкой ЭЛА 60/15 на малогабаритной установке СВ-112. Рабочее расстояние составляло 100 мм. Образец закрепляли в специальном сборочном приспособлении для сварки тонкостенных криволинейных поверхностей (элементов лопатки) с соблюдением минимальных сборочных зазоров в стыке и в месте пристыковки выводных планок (рис. 1).

Эксперименты сначала проводили на скорости сварки 15...25 мм/с, однако значительная разница между скоростью ЭЛС и смещением электронного пучка поперек стыка не позволяла корректно выполнить в процессе сварки смещение пучка в стык. В дальнейшем от корректировки пучка пришлось отказаться и ЭЛС осуществляли по ранее установленному и зафиксированному в программе сварки усредненному положению пучка по всей длине стыка. Снятие перечисленных выше ограничений по позиционированию позволило перейти к ЭЛС на скорости до 50 мм/с, которая рекомендована для сварки стыков малой (0,8...1,6 мм) толщины, при этом требуются минимальные удельные тепловложения [9].

В связи с изменяющимся по толщине сечением свариваемого стыка потребовалось в программу ЭЛС ввести изменения тока пучка на входе-выходе лопатки. Ток фокусирующей линзы оставался неизменным. При ЭЛС экспериментальных образцов с нормальной фокусировкой (по минимальному фокальному пятну на поверхности изделия) получали швы, имеющие форму стенок в поперечном сечении, близкую к клиновидной, что в наших условиях недопустимо. Более целесообразно осуществлять ЭЛС с перефокусировкой пучка, что позволяет получать швы с почти параллельными стенками по всей толщине детали и с относительно широким проваром заподлицо с незначительным усилением. При этом нивелировалась опасность скрытых непроваров, связанных с неточностями сборки или настройки пучка на стык. Имеющие место вследствие быстротечности переходного процесса сварки уменьшение усиления шва на тонких (0,5...0,6 мм) концах лопаток и незначительные подрезы с лицевой стороны проплава (рис. 2) при необходимости устранялись декоративными локальными проходами.

Для получения швов требуемой формы применялась более трудоемкая техника сварки. Чтобы не допустить возможных подрезов и утонений шва при переходном режиме ЭЛС, ввод-вывод сварочного тока на концах лопаток осуществляли на минимально возможном отрезке длины шва, при этом значения тока подбирали в соответствии с толщиной свариваемого участка стыка. Крутизна нарастания-спада тока сварки и место ввода-вывода определяли экспериментально и фиксировали в программе ЭЛС. Значение тока сварки на основном участке шва составляло 30 мА.

Как вариант использовали импульсную ЭЛС с частотой 25...100 Гц и скважностью 1:4. При этом в ряде случаев наблюдалось нестабильное формирование клиновидного шва с неполным заполнением металлом (корневые раковины). По-

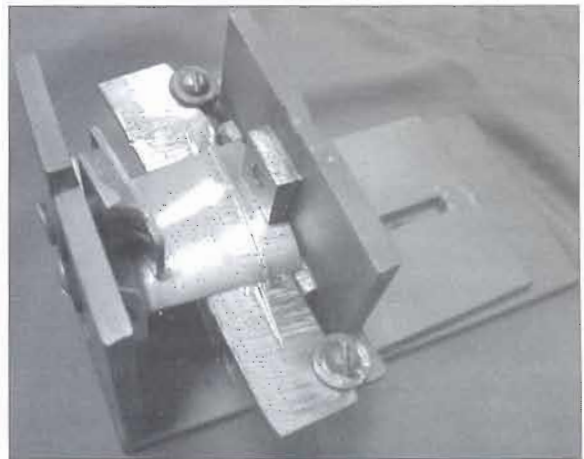


Рис. 1. Сборочное приспособление для выполнения ЭЛС титановых лопаток

видимому, реализация преимуществ импульсного режима сварки на больших скоростях при сквозном проплавлении проблематична.

Для повышения работоспособности сварных швов, выполненных на титановых сплавах типа ВТЗ-1 (жаропрочных $\alpha+\beta$ -сплавов), во многих работах [7, 9, 10] предлагались различные способы: использование термообработки, приставок из менее прочных и более пластичных материалов, введение в металл шва легирующих материалов и модификаторов. За рубежом из-за трудоемкости применения в промышленности указанных способов от них почти отказались, оставив в ряде случаев только отжиг. Требуемые механические свойства сварных соединений и устранение структурной неоднородности получают благодаря оптимизации термомодеформационного цикла ЭЛС.

Определенные трудности в достижении равнопрочности швов, выполненных ЭЛС, могут возникнуть из-за их резкого охлаждения после термического цикла сварки (со значительно большими скоростями в околошовной зоне (ОШЗ), чем, например, при аргонодуговой сварке). Вместе с



Рис. 2. Общий вид лопатки с ремонтным швом: а — лицевая сторона; б — обратная

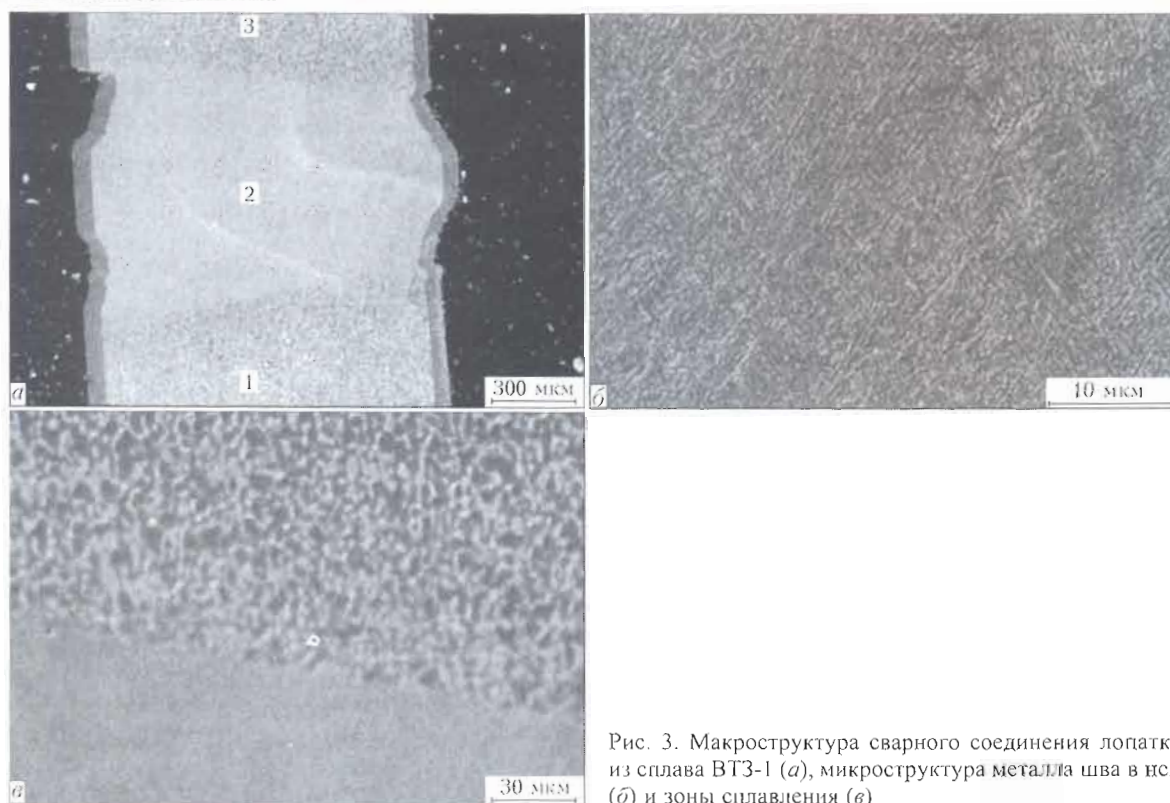


Рис. 3. Макроструктура сварного соединения лопатки из сплава ВТЗ-1 (а), микроструктура металла шва в исм (б) и зоны сплавления (в)

Химический состав (мас. %) основных компонентов в сварном шве, выполненном на лопатке из сплава ВТЗ-1

Участок сварного шва	Спектр анализа в точках по рис. 3, а	Al	Si	Ti	Cr	Fe	Mo
Основа	1	6,48	0,62	89,18	0,16	0,14	3,42
Шов	2	6,44	0,43	89,46	—	0,13	3,53
Основа	3	6,07	0,58	89,74	—	—	3,62

тем, перегрев шва и ОШЗ титановых $\alpha+\beta$ -сплавов мартенситного типа может оказать негативное влияние на размер зерна металла, состояние его границ и соответственно ударную вязкость. Поэтому применять предварительную и (или) последующую термообработку после ЭЛС с целью получения высоких механических свойств сварного соединения следует осторожно. После оценки работоспособности полученных сварных соединений возможен при эксплуатационной нагрузке полный отказ от термообработки вне сварочной вакуумной камеры.

В настоящей работе благодаря отлаженной технике ЭЛС были получены бездефектные сварные соединения с приемлемой структурой металла ОШЗ.

Микроструктура поперечного сечения сварного соединения лопатки представлена на рис. 3, а. Ширина металла шва не превышает 1 мм. Структура металла шва характеризуется размером зерна 30...60 мкм. Металл шва имеет мартенситную структуру (рис. 3, б) с микротвер-

достью HV 4140 МПа. На участке ОШЗ (рис. 3, в) микротвердость составляет HV 3090 МПа. Основной металл имеет микротвердость HV 3090 МПа. Ширина ОШЗ, где наблюдался распад пересыщенного твердого раствора в результате термического воздействия, составляла 30...50 мкм.

Исследование химического состава металла шва, выполненного ЭЛС, показало, что в области сварного шва хром отсутствовал (таблица). Очевидно, в процессе сварки он сублимирует из расплава.

Результаты исследований механических свойств полученных сварных соединений показали, что данную технику ремонтной ЭЛС можно рекомендовать для промышленного применения.

1. *Электронно-лучевая* сварка направляющих лопаток паровых турбин / Л. И. Живага, С. И. Герман, Н. Е. Левенберг, А. А. Ситницкий // Материалы VII Всесоюз. конф. по электронно-лучевой сварке, г. Киев, 8-11 дек. 1980 г. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1981. — С. 27-40.
2. *Применение* электронно-лучевой сварки для восстановления лопаток паровых турбин / С. И. Герман, Н. Е. Левенберг, А. А. Ситницкий и др. // Там же. — 1981. — С. 40-41.
3. *Жеманок П., Петрик И.* Основные тенденции развития сварочного производства на ОАО «Мотор Сич». Проблемы и перспективы // Двигатель. — 2001. — № 3, май-июнь. — С. 30-32.
4. *Быков И., Кресанов И.* Прогрессивные процессы металлургического производства — основа обеспечения высокого качества продукции // Там же. — С. 28-29.
5. *Технология* восстановления лопаток газовых турбин / М. Л. Жадкевич, А. А. Бонларев, В. И. Зеленин и др. // Автомат. сварка. — 2002. — № 2. — С. 53-54.

6. Гайкин В. Совершенство двигателей определяется совершенством технологии // Двигатель. — 2003. — № 6. — С. 11–16.
7. Сравнительные исследования электронно-лучевой и дуговой сварки конструкций из кованных заготовок титанового сплава BT3-1 / В. А. Балабанов, В. В. Ковалев, В. Ф. Лупырь и др. // Материалы VII Всесоюзн. конф. по электронно-лучевой сварке, г. Киев, 8–11 дек. 1980 г. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1981. — С. 55–58.
8. Технологические особенности получения качественных сварных швов при ЭЛС толстолистовых титановых сплавов / В. В. Ардентов, А. И. Шестаков, В. Р. Петренко, Г. С. Расплетин // Там же. — С. 106–109.
9. Технология электронно-лучевой сварки / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: Наук. думка, 1987. — 256 с.
10. Курочко Р. С., Иода А. В., Хорев М. А. Термическая обработка сварных соединений сплава BT-23, выполненных электронно-лучевой сваркой // Авиац. пром-сть. — 1982. — № 5. — С. 58–59.

The method for repair of complex-configuration titanium blades with the 1...2 mm thick joint location by using EBW is considered. The software for achieving the high-efficiency welding parameters (with speed of up to 50 mm/s), which provide the quality weld metal, has been developed. Permission of refusal from heat treatment of the blades outside the vacuum welding chamber to provide the required quality of the welds on the titanium blades repaired by EBW is substantiated.

Посгулила в редакцию 17.12.2007



СВАРКА

8-я Международная специализированная выставка-конференция

2–4 декабря 2008 г.

г. Екатеринбург

Основные направления выставки:

- ✓ Оборудование и технологии для электродуговой сварки металлов
- ✓ Оборудование и технологии для наплавки и напыления
- ✓ Оборудование и технологии для плазменной, лазерной, газоплазменной сварки и резки
- ✓ Оборудование и технологии для сварки пластмасс
- ✓ Оборудование и технологии для электрической контактной сварки
- ✓ Вспомогательное сварочное оборудование
- ✓ Оборудование и технологии для производства сварочных электродов
- ✓ Оборудование и технологии для пайки
- ✓ Спецодежда, средства индивидуальной защиты
- ✓ Материалы для сварки, наплавки, напыления, резки, пайки
- ✓ Средства и методы защиты от вредных производственных факторов в сварочном производстве
- ✓ Инструменты для сварки и механической обработки
- ✓ Промышленная вентиляция
- ✓ Методы обучения и повышения квалификации персонала

Организатор:

Екатеринбург, ул. Свердлова, 11а, оф. 505

Тел.: (343) 3-555-195, 370-33-74

Http:// www.uv2000.ru

E-mail: vystavka@r66.ru