

УДК 621.791.793
О-72

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ СВАРКИ ТИТАНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ МЕТОДОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ

В. Б. Порохонько, мл. науч. сотр.;

И. В. Протокивиллов, канд. техн. наук;

Д. А. Петров, вед. инж.

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, г. Киев

Аннотация. Приведены результаты экспериментальных исследований процесса электрошлаковой сварки титановых заготовок толщиной 80 и 120 мм в узкий зазор и с электромагнитным воздействием на сварочную ванну. Показана возможность измельчения структуры металла шва посредством импульсного воздействия внешним поперечным магнитным полем.

Ключевые слова: электрошлаковая сварка, кристаллизация, макроструктура, сварочный шов, узкий зазор, термический цикл сварки, электромагнитное воздействие.

Анотація. Наведені результати експериментальних досліджень процесу електрошлакового зварювання титанових заготовок товщиною 80 і 120 мм у вузький зазор та з електромагнітним впливом на зварювальну ванну. Показано можливість подрібнення структури металу шва за допомогою імпульсного впливу зовнішнім поперечним магнітним полем.

Ключові слова: електрошлакове зварювання, кристалізація, макроструктура, зварювальний шов, вузький зазор, термічний цикл зварювання, електромагнітний вплив.

Abstract. The results of experimental tests of the electro slag welding process of titanium blocks with thickness of 80 and 120 mm in the narrow gap and with the electromagnetic impact on the welding pool have been given. The possibility of structure refinement of the metal seam by impulse effect of external transverse magnetic field has been performed.

Keywords: electro slag welding, crystallization, macrostructure, welding seam, narrow gap, welding thermal cycle, electromagnetic effect.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Электрошлаковая сварка (ЭШС) является эффективным способом соединения толстостенных изделий из титана и сплавов на его основе. Одно из главных преимуществ ЭШС — ее высокая производительность и возможность соединения за один проход металла толщиной 30...400 мм без разделки кромок [2, 3, 5, 9, 10].

Однако, несмотря на очевидные достоинства, ЭШС зачастую ограничена в практическом применении из-за неблагоприятного влияния термического цикла сварки и гидродинамических процессов в сварочной ванне на формирование структуры металла шва и околосшовной зоны. Указанные особенности ЭШС могут приводить к формированию грубой крупнозернистой структуры металла шва, охрупчиванию зоны термического влияния (ЗТВ) и негативно влиять на свойства сварных соединений.

Термическая обработка сварных соединений, как правило, устраняет неоднородность структуры и механических свойств различных участков сварного соединения, однако существенно усложняет и удорожает процесс ЭШС. Кроме того, она часто неприемлема для особенно крупных изделий. Поэтому снижение степени перегрева металла шва и ЗТВ было и остается одной из ключевых проблем технологии ЭШС [8].

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

В настоящее время разработаны различные технологические приемы и методы воздействия на процесс электрошлаковой сварки, направленные на оптимизацию структуры металла шва и ЗТВ. Такие методы основаны на введении в сварочную ванну различных модификаторов и присадок, применении принудительного охлаждения металла шва и ЗТВ, дозированной подаче электрической мощности в зону сварки, сопутствующем подогреве металла шва и ЗТВ для местной непрерывной нормализации, введении ультразвуковых и механических колебаний, воздействии внешними магнитными полями и др. [7]. Одни методы достаточно эффективны для управления свойствами металла шва, однако слабо влияют на ЗТВ. Другие, наоборот, дают возможность воздействовать на ЗТВ, но не позволяют гомогенизировать и измельчать структуру металла шва.

В связи с изложенным *актуальной* задачей является разработка комплексных методов воздействия на процесс ЭШС, направленных на повышение структурной однородности металла шва и снижение негативного влияния термического цикла сварки на ЗТВ.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ — повышение однородности структуры и механических свойств сварных

соединений при ЭШС титановых заготовок толщиной 80...120 мм путем уменьшения величины сварочного зазора и воздействия на сварочную ванну внешними магнитными полями.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Одним из тепловых методов, позволяющим снизить погонную энергию сварки и сузить ЗТВ, является сварка в узкий зазор [10, 11], для которой характерно снижение объема шлаковой ванны, присадочного материала и увеличение скорости сварки. Техника сварки в узкий зазор сходна со стандартным процессом ЭШС, однако требует применения дополнительных мер, направленных на предотвращение короткого замыкания электродов на свариваемые кромки и на гарантированное проплавление основного металла.

Для проведения исследований с электромагнитным воздействием на формирование сварных соединений предварительно была изучена возможность снижения величины сварочного зазора при ЭШС титановых заготовок плавящимся мундштуком.

При ЭШС титана рекомендуемый зазор между кромками в месте сварки составляет 30...34 мм [6]. Сварке подвергали титановые заготовки сплава ВТ1 размером 120×120×270 мм, $\delta_{0,м} = 120$ мм, с зазором 22 мм (рис. 1). Эксперименты проводили на установке А-550, используя трансформатор ТШП-10000/1. Применяли плавящиеся мундштуки из технического титана с двумя каналами для электродных проволок диаметром 5 мм. В качестве шлака использовали флюс АН-Т4. Сварку осуществляли со стандартной величиной зазора между кромками — 30 мм и в узкий зазор — 22 мм.

В первом случае в качестве входного и выходного карманов использовали остающиеся привариваемые

титановые накладки, во втором — медные водоохлаждаемые формирующие планки. Для исследования термического цикла сварки использовали термопары типа ХА, которые размещали в свариваемых образцах на расстоянии 30, 40, 50, 60 мм от кромок. Горячие спаи термопар крепили в отверстиях в основном металле на глубине 20 мм конденсаторной сваркой. Для регистрации и обработки параметров процесса использовали программные пакеты LabView и PowerGraph. Из полученных сварных соединений изготавливали продольные и поперечные тимплеты для анализа структуры металла, параметров швов и ЗТВ. Параметры экспериментов приведены в сопоставительной табл. 1.

В обоих случаях (стандартная ЭШС и ЭШС в узкий зазор) электрошлаковый процесс был стабильным, без выбросов шлаковой ванны, коротких замыканий и дуговых разрядов. Швы имели блестящую, гладкую боковую поверхность (рис. 2). Макроструктура металла шва — плотная, без шлаковых включений, пор, трещин и прочих дефектов (рис. 3). Твердость НВ по высоте шва распределена равномерно. По ширине шва наблюдается увеличение значений твердости в зоне сплавления в среднем на 10%.

Проплавление кромок основного металла в поперечном сечении при сварке в узкий зазор — относительно равномерное (см. рис. 3, в). Наблюдается незначительное снижение проплавления в центральной части шва (4 мм) по сравнению с периферийными участками (7 мм), что связано с тепловыделением в ванне, в месте плавления электродной проволоки.

Результаты экспериментов показали, что снижение величины сварочного зазора с 30 до 22 мм приводит к увеличению скорости сварки (производительности процесса) на 13% и уменьшением удельной

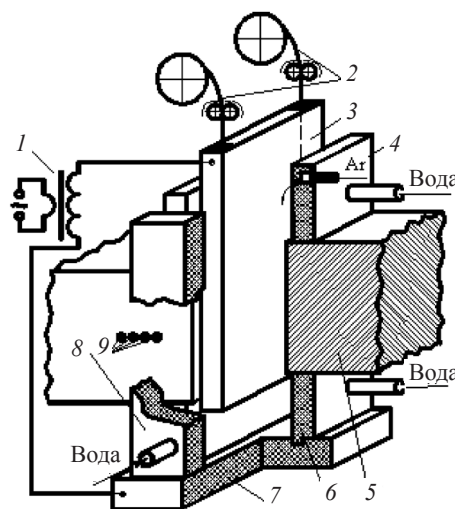
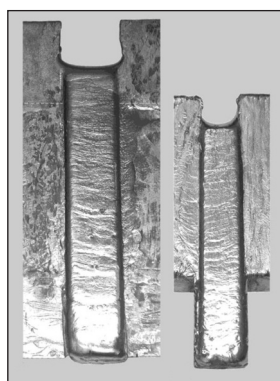


Рис. 1. Схема сборки образцов под ЭШС: 1 — источник питания; 2 — сварочная проволока; 3 — плавящийся мундштук; 4, 6 — выводная и входная водоохлаждаемые формирующие планки; 5 — свариваемый образец; 7 — поддон; 8 — боковое формирующее устройство; 9 — отверстия для термопар

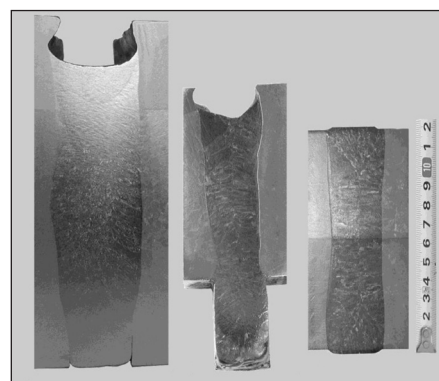
Таблиця 1. Параметры ЭШС титановых заготовок ($\delta_{\text{о.м}} = 120$ мм)

Параметры	Традиционная ЭШС	ЭШС в узкий зазор
Величина зазора, мм	30	22
$I_{\text{св}}$, А	$\frac{3000 \dots 4000}{3500}$	$\frac{2500 \dots 3500}{3000}$
$U_{\text{св}}$, В	$\frac{23 \dots 25}{24}$	$\frac{24 \dots 26}{25}$
$V_{\text{св}}$, м/ч	2,2	2,5
Удельная погонная энергия сварки, кДж/см ²	$\frac{93 \dots 135}{114}$	$\frac{70 \dots 106}{88}$
Величина проплавления кромок, мм	$\frac{10 \dots 14}{12}$	$\frac{4 \dots 7}{5,5}$
Глубина жидкометаллической ванны, мм	22	19
Ширина жидкометаллической ванны, мм	54	33
Коэффициент формы ванны	2,5	1,7
Угол пересечения кристаллитов шва, град	120	160



а) б)

Рис. 2. Боковые поверхности сварных соединений, выполненных стандартной ЭШС (а) и ЭШС в узкий зазор (б)



а) б) в)

Рис. 3. Макроструктуры сварных соединений: а) — продольное сечение при стандартной ЭШС; б), в) — продольное и поперечное сечения при ЭШС в узкий зазор

погонной энергии процесса на 23%. Величина проплавления свариваемых кромок при этом снижается в среднем с 12 до 5,5 мм (на 54%). Указанные эффекты достигаются прежде всего за счет уменьшения объема наплавленного металла и оптимизации тепло-массопереноса в ванне.

Анализ термических циклов сварки (рис. 4, 5) показал, что максимальная температура нагрева основного металла на расстоянии 30 мм от свариваемой кромки снизилась с 1250 до 620 °С. Ширина зоны нагрева металла выше температуры 840 °С (минимальная температура начала полиморфных превращений для $\alpha + \beta$ титановых сплавов [4]) при ЭШС в узкий зазор уменьшилась более чем в два раза (с 44 до 20 мм). Это снижает вероятность протекания процессов нежелательных структурных превращений в основном металле.

Таким образом, при ЭШС титановых заготовок толщиной 120 мм возможно уменьшение величины сварочного зазора до 22 мм. Данный прием оптимизирует термический цикл ЭШС, однако не позволяет

воздействовать на измельчение и гомогенизацию металла шва. Последний характеризуется грубой дендритной структурой с кристаллитами, пересекающимися по оси шва под углом около 160°.

Было исследовано электромагнитное воздействие на кристаллизацию металла шва. Физический механизм электромагнитного воздействия на процесс ЭШС основан на взаимодействии внешнего магнитного поля со сварочным током. Вследствие такого взаимодействия в сварочной ванне формируются объемные электромагнитные силы, изменяющие гидродинамическое состояние в ванне и условия кристаллизации металла [5, 6].

Для управления гидродинамикой сварочной ванны при ЭШС возможно использование продольного и поперечных магнитных полей (рис. 6). При этом в зависимости от типа внешнего магнитного поля (постоянное, переменное) в ванне можно создавать электровихревые течения или вибрацию расплава [5].

Воздействие продольным магнитным полем (см. рис. 6, а) позволяет эффективно управлять

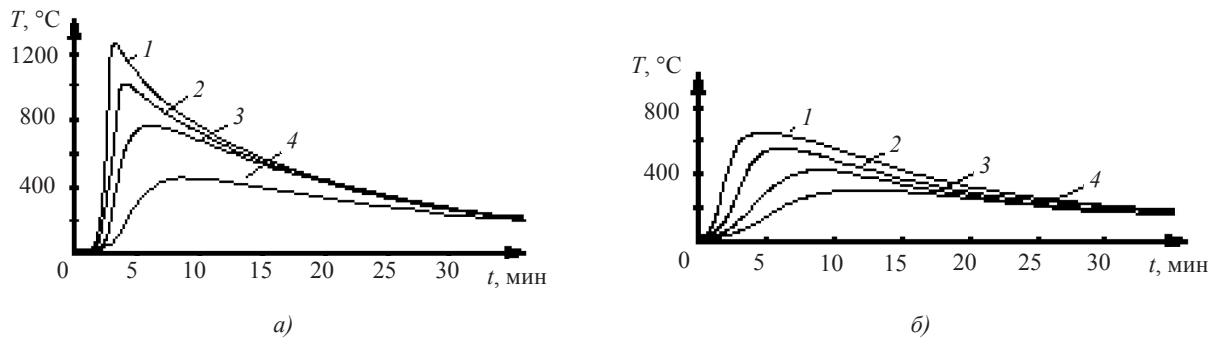


Рис. 4. Термические циклы стандартной ЭШС (а) и ЭШС в узкий зазор (б) для различных расстояний от свариваемой кромки: 1 — 30 мм; 2 — 40 мм; 3 — 50 мм; 4 — 60 мм

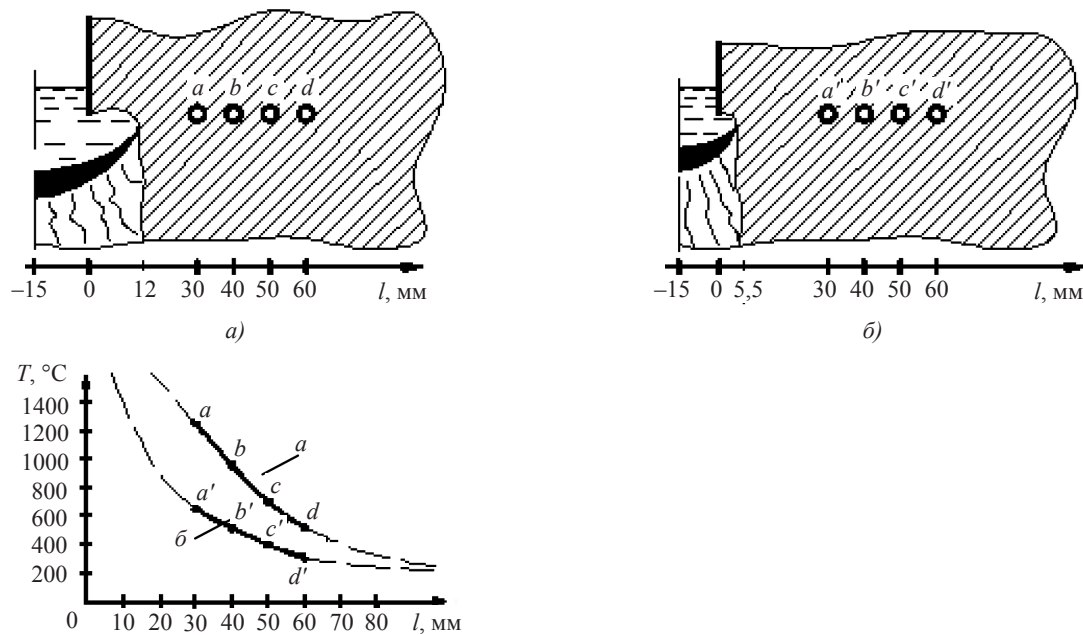


Рис. 5. Максимальные температуры в сварном образце в зависимости от расстояния до свариваемой кромки: а) — стандартная ЭШС; б) — ЭШС в узкий зазор

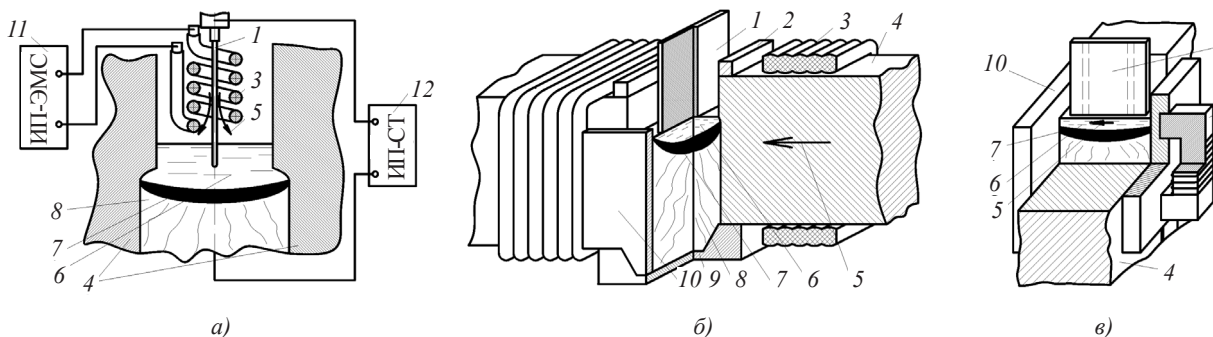


Рис. 6. Схемы ЭШС в продольном (а) и поперечном (б, в) магнитных полях: 1 — плавящийся мундштук (электрод); 2, 10 — выводные и формирующие планки; 3 — электромагнитное устройство; 4 — свариваемые изделия; 5 — линии магнитного поля; 6, 7 — шлаковая и металлическая ванны; 8 — сварной шов; 9 — входной карман; 11, 12 — источники питания электромагнитной системы и сварочного тока

формированием и отрывом капель электродного металла. Недостатком данного метода является сложность создания в ванне продольного поля достаточной индукции, что ограничивает его применение для управления структурой металла. Более эффективным для этих целей является использование поперечных магнитных полей (см. рис. 6, б, в).

Схема сварки, представленная на рис. 6, б, может применяться при сварке относительно компактных изделий. В данном случае катушки электромагнита смонтированы на свариваемых деталях, одновременно выполняющих функции магнитопроводов, благодаря чему удается достичь высоких значений индукции магнитного поля в зоне сварки. При такой схеме в сварочной ванне формируются электромагнитные силы, ориентированные вдоль сварочного зазора. В случае применения постоянного магнитного поля его взаимодействие с переменным током сварки вызывает вибрацию сварочного расплава вдоль зазора, что позволяет выравнивать температурное поле ванны и проплавление кромок. Недостатком данной схемы электромагнитного воздействия является сложность ее реализации при сварке крупногабаритных изделий и изделий сложной конфигурации.

При сварке протяженными швами целесообразно использование магнитной системы, расположенной с противоположных сторон свариваемых изделий, у водоохлаждаемых ползунов и перемещающейся вдоль кромок со скоростью сварки (см. рис. 6, в). В данном случае взаимодействие осевой составляющей переменного тока сварки с постоянным магнитным полем создает вибрацию расплава сварочной ванны поперек кромок. Такие возвратно-поступательные движения расплава в двухфазной области способствуют гомогенизации и измельчению структуры металла шва. Поперечная вибрация в сварочном зазоре также увеличивает проплавление свариваемых кромок, что позволяет снижать погонную энергию сварки. Недостатком данного способа является неоднородность магнитного поля вследствие значительной величины зазора между полюсами электромагнита, определяемой толщиной свариваемых изделий и водоохлаждаемых ползунов. С увеличением толщины изделий эффективность электромагнитного воздействия снижается.

Таблица 2. Режимы ЭШС с внешним электромагнитным воздействием

№	$U_{св}$, В	$I_{св}$, А	$V_{св}$, м/ч	Параметры магнитного поля*		
				$t_{импульса}$, с	$t_{паузы}$, с	B , Тл
1	24	3500	2,16	—	—	—
2	19	3700	2,59	Непрерывное воздействие		0,012
3	23	3500	2,54	1,0	10	0,06
4	25	3000	2,57	1,5	10	0,08
5	27	2500	2,05	1,5	5	0,24
6	25	2500	1,76	1,5	7	0,18

*В экспериментах № 2, 3 использовали схему воздействия по рис. 6, б, в экспериментах № 4–6 — по рис. 6, в.

Методы электромагнитного воздействия исследовали в условиях электрошлаковой сварки плавящимся мундштуком титановых плит сплава ВТ1 толщиной 80 мм. Использовали схемы воздействия поперечным полем, представленные на рис. 6, б и 6, в. В первом случае (см. рис. 6, б) постоянное магнитное поле создавали с помощью медных катушек, смонтированных на свариваемых деталях. Во втором (см. рис. 6, в) магнитное поле в сварочный зазор вводили электромагнитами, полюса которых располагали около водоохлаждаемых формирующих планок. Питание катушек электромагнитов осуществляли постоянным током и циклическими импульсами постоянного тока, чередующимися с паузами. Электрические режимы и параметры электромагнитного воздействия приведены в табл. 2.

Проведенные эксперименты показали, что в диапазоне индукции внешнего магнитного поля 0...0,18 Тл процесс сварки проходит стабильно, с получением плотных швов, без пор, шлаковых включений и прочих дефектов. При индукции магнитного поля в зоне сварки 0,24 Тл наблюдалось незначительное ухудшение стабильности электрошлакового процесса, выраженное в возмущениях шлаковой ванны и колебаниях тока сварки.

Схема электромагнитного воздействия, приведенная на рис. 6, б, оказалась менее эффективной. Вибрация расплава с частотой 50 Гц вдоль зазора, возникающая в данном случае, не привела к существенному изменению характера кристаллизации металла шва. Макроструктура шва характеризовалась наличием столбчатых кристаллов, ориентированных перпендикулярно оси шва (рис. 7, б). Кроме того, необходимость расположения катушек непосредственно на свариваемых изделиях существенно ухудшает технологичность данного способа создания магнитного поля.

Более эффективным оказалось применение магнитного поля, силовые линии которого ориентированы вдоль зазора (см. рис. 6, в). При этом лучшие результаты по гомогенизации и измельчению структуры металла шва были получены при импульсном воздействии магнитным полем индукцией 0,08 Тл с продолжительностью импульса $t_{имп} = 1,5$ с и паузы $t_{паузы} = 10$ с. Использование импульсных магнитных

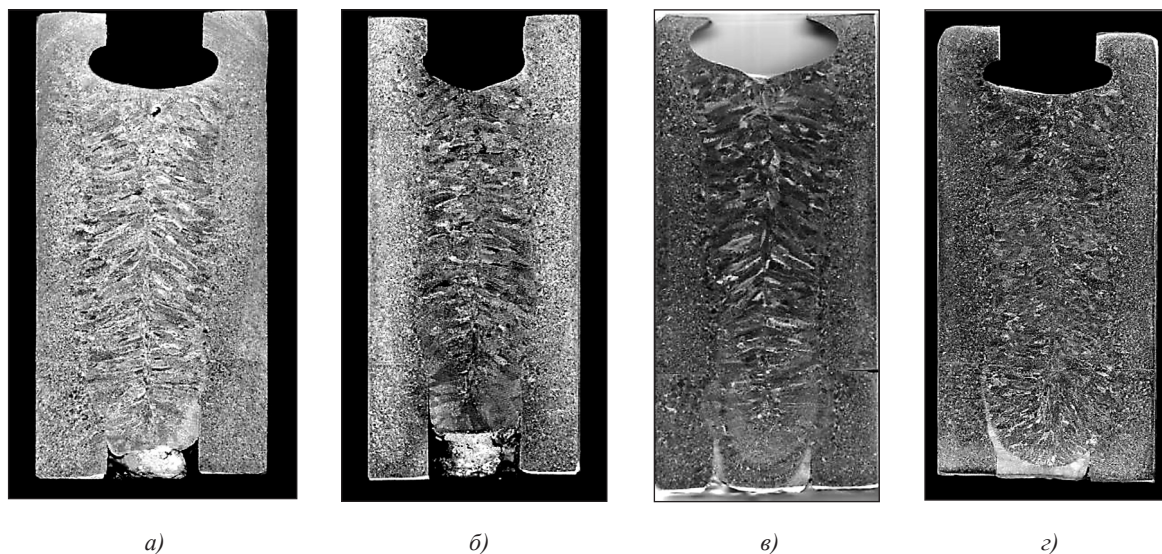


Рис. 7. Макроструктуры сварных соединений, выполненных при различных режимах электромагнитного воздействия (а, б, в, z — соответствуют экспериментам № 1, 2, 3, 4 в табл. 2)

полей позволяет интенсифицировать электромагнитное воздействие на расплав сварочной ванны за счет постоянного изменения гидродинамических течений в момент импульсов магнитного поля и вызванных ими гидродинамических «ударов» на фронт кристаллизации. Указанные эффекты способствуют измельчению структуры металла шва и повышению его гомогенности (см. рис. 7, в). При этом вызванная магнитным полем вибрация расплава поперек зазора увеличивает проплавление основного металла, что позволяет уменьшать значение погонной энергии сварки.

Следует отметить, что к недостаткам приведенной схемы воздействия, более остро проявляющимся с увеличением толщины свариваемых изделий, следует отнести высокие массогабаритные характеристики используемых электромагнитов. Это усложняет и ухудшает технологичность процесса сварки. Представляется перспективным использование импульсных магнитных полей, созданных разрядами конденсаторов на магнитный контур [1]. Такой подход позволит достичь высоких пиковых токов в обмотках электромагнита и, соответственно, высоких значений магнитной индукции при снижении его массы и габаритов.

ВЫВОДЫ

1. Проведенные исследования показали целесообразность использования комплексных тепловых и гидродинамических методов воздействия на формирование сварных соединений при ЭШС титана путем уменьшения величины сварочного зазора и воздействия на сварочную ванну импульсным поперечным магнитным полем.

2. Уменьшение величины зазора с 30 до 22 мм при ЭШС плавящимся мундштуком титановых заготовок толщиной 120 мм позволяет увеличить скорость сварки на 13% и уменьшить удельную погонную энергию сварки на 23%. При этом ширина жидкометаллической ванны снижается с 54 до 33 мм, а глубина — с 22 до 19 мм.

3. Уменьшение погонной энергии при ЭШС в узкий зазор приводит к существенному уменьшению ширины ЗТВ и снижению вероятности нежелательных структурных превращений в основном металле.

Для введения в сварочную ванну внешних поперечных магнитных полей разработано оборудование и исследованы технологические особенности его использования при ЭШС титана.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Возможности использования импульсных электромагнитных воздействий в электрошлаковых процессах [Текст] / Я. Ю. Компан, А. Т. Назарчук, И. В. Протоковиллов, Д. А. Петров // Современная электрометаллургия. — 2012. — №2. — С. 8–13.
- [2] Гуревич, С. М. Справочник по сварке цветных металлов [Текст] / С. М. Гуревич. — 2-е изд., перераб. и доп. — К. : Наук. думка, 1990. — 512 с.
- [3] Замков, В. Н. ЭШС плит из титанового сплава Grade 5 [Текст] / В. Н. Замков, И. И. Лычко, В. Ф. Топольский // Автоматическая сварка. — 1999. — №9. — С. 73–75.

- [4] **Ильин, А. А.** Титановые сплавы. Состав, структура, свойства [Текст] : справочник / А. А. Ильин, Б. А. Колачев, И. С. Полькин. — М. : ВИС-МАТИ, 2009. — 520 с.
- [5] **Компан, Я. Ю.** Электрошлаковая сварка и плавка с управляемыми МГД-процессами [Текст] / Я. Ю. Компан, Э. В. Щербинин. — М. : Машиностроение, 1989. — 272 с.
- [6] **Кузнецов, В. Д.** Магнитное управление электрошлаковым процессом [Текст] / В. Д. Кузнецов, Н. К. Козаков, Л. М. Шальда. — К. : Вища шк. Изд-во при Киев. ун-те, 1987. — 64 с.
- [7] **Протоковиллов И. В.** Управление формированием сварных соединений при ЭШС (Обзор) [Текст] / И. В. Протоковиллов, В. Б. Порохонько // Автоматическая сварка. — 2012. — № 10. — С. 54–60.
- [8] Электрошлаковая сварка (перспективы развития) [Текст] / Б. Е. Патон, Д. А. Дудко, А. М. Пальти [и др.] // Автоматическая сварка. — 1999. — № 9. — С. 4–6.
- [9] Электрошлаковая сварка титановых сплавов [Текст] / Я. Ю. Компан, В. Ф. Грабин [и др.]. — Ташкент : ФАН, 1975. — 84 с.
- [10] Электрошлаковая технология за рубежом [Текст] / Б. И. Медовар, А. К. Цыкуленко, А. Г. Богаченко, В. М. Литвинчук. — К. : Наук. думка, 1982. — 320 с.
- [11] **Krishna, K.** Narrow-gap improved electroslag welding for bridges [Text] / K. Krishna // Welding in the world. — 1996. — Vol. 38, November. — P. 325–335.

© В. Б. Порохонько, И. В. Протоковиллов, Д. А. Петров

Надійшла до редколегії 21.11.2012

Статтю рекомендує до друку член редколегії Вісника НУК
д-р техн. наук, проф. *В. Ф. Квасницький*

Статтю розміщено у Віснику НУК № 5, 2012