

III КОНСТРУКЦІЙНІ І ФУНКЦІОНАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ

УДК 669.245.018.044:620.193.53

Канд. техн. наук С. В. Гайдук¹, канд. техн. наук И. А. Петрик²,

канд. техн. наук В. В. Кононов¹

¹ Запорожский национальный технический университет, ² АО «Мотор Сич»; г. Запорожье

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СВАРИВАЕМОСТИ ЛИТЕЙНЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

Методом аргодуговой сварки проведена сравнительная оценка свариваемости литейных жаропрочных никелевых сплавов ВЖЛ12Э, ЖСЗЛС и опытного сплава ЖСЗЛС-М, с повышенными прочностными характеристиками, двумя видами присадочных материалов, сплавом-основой ЖСЗЛС-М и серийной присадкой марки ЭП367. Приведены сравнительные металлографические исследования микроструктуры сварных швов и зоны термического влияния.

Ключевые слова: литейные жаропрочные никелевые сплавы, присадочные материалы, свариваемость, сварной шов, зона термического влияния, структура, морфология фаз.

Введение

Внедрение в промышленное производство новых литейных жаропрочных никелевых сплавов для газотурбинной техники требует от материалов комплекс высоких эксплуатационных свойств: жаропрочность, коррозионную стойкость, а также хорошие технологические свойства (литейные, свариваемость и т. д.). Главным недостатком жаропрочных никелевых сплавов является ограниченная технологическая свариваемость, вызванная повышенной склонностью сварных соединений к образованию горячих трещин различного типа при аргодуговой сварке. Хотя данный технологический процесс часто является незаменимым при устранении литейных дефектов на ответственных деталях ГТД. Технологические трудности получения качественных сварных швов, не имеющих горячих трещин, во многих случаях являются единственно возможным вариантом получения соединений из высоколегированных литейных жаропрочных никелевых сплавов [1–5].

Улучшение свариваемости жаропрочных никелевых сплавов с качественно сформированными сварными швами и отработка соответствующей технологии подчеркивается, с одной стороны, нормативными требованиями обеспечить отсутствие в швах трещин любой топографии и морфологии, а с другой стороны – отсутствием приемлемых технологических решений, позволяющих устранить литейных дефектов, в соответствии с указанной нормативной документацией. Вследствие этого в ряде ответственных изделий отраслевыми нормативами допускается наличие микротрещин определенной длины или количества пористости на единицу площади сварного шва [6–12].

Таким образом, только комплексный подход, заключающийся в единстве решения материаловедческих и тех-

нологических задач, позволяет решать задачи по устранению литейных дефектов методом аргодуговой сварки (АДС) применительно к ответственным деталям ГТД, а также обеспечить технологические возможности их ремонтной сварки, с целью повышения надежности их работы и увеличения ресурса эксплуатации [13–21].

Постановка задачи

Целью настоящей работы являлось исследование свариваемости разработанного опытного сплава ЖСЗЛС-М в сравнении с промышленными сплавами ЖСЗЛС и ВЖЛ12Э.

Химический анализ плавок проводился стандартными методами, согласно требованиям ТУ 14-1689-73 и ОСТ 1.90126-85. Спектральный химический анализ проводился на оптическом эмиссионном приборе ARL-4460 (квантометр одновременного многоканального анализа) в волновом диапазоне 170–800 нм. Химический состав опытных плавок исследованных сплавов приведен в таблице 1.

Химический состав плавок образцов из промышленных сплавов ВЖЛ12Э и ЖСЗЛС по содержанию легирующих элементов соответствовал нормам ОСТ 1.90126-85 и нормативно-технической документации. Состав плавок образцов из разработанного опытного сплава ЖСЗЛС-М по содержанию легирующих элементов соответствовал составу, заявленному в патенте Украины № 67814 от 12.03.2012.

Химический состав серийной присадочной проволоки марки ЭП367 соответствовал нормам ГОСТ 2246-70 (табл. 2).

Для металлографических исследований предварительно проведен ЛЮМ- контроль всех исследуемых темплетов после сварки, как в литом состоянии (до термо-

Таблиця 1 – Химический состав опытных плавок исследованных сплавов

Марка сплава	Содержание элементов, % (по массе)										
	C	Cr	Al	Ti	Mo	W	Co	Ta	Hf	B	Ni
ЖСЗЛС-М	0,09	14,3	3,0	3,0	1,8	6,8	4,5	2,9	0,35	0,012	ост.
ВЖЛ12Э	0,15	9,5	5,5	4,4	3,1	1,6	4,8	Nb = 0,7	V = 0,7	0,015	ост.
ЖСЗЛС	0,08	16,2	2,7	2,7	3,5	3,5	4,5	–	–	0,011	ост.

Таблиця 2 – Химический состав присадочных материалов

Марка сплава	Содержание элементов, % (по массе)										
	C	Cr	Al	Ti	Mo	W	Co	Ta	Hf	B	Ni
ЖСЗЛС-М	0,09	14,3	3,1	3,1	1,8	6,8	4,5	2,9	0,35	0,012	Осн.
ЭПЗ67	≥ 0,08	14,0-16,0	–	≥ 0,2	14,0-16,0	–	–	–	–	Fe ≥ 4,0	Осн.

обработки), так и после сварки и термической обработки (ТО) с целью контроля образцов сплавов на наличие различных дефектов в сварных швах (СШ) и околошовных зонах (ОШЗ) (трещины, пористость, оксидные пленки, неспаи и т. д.). После выполнения зачистки сварных швов на образцах-темплетах были проведены сравнительные металлографические исследования микроструктуры сварных швов (СШ), околошовных зон (ОШЗ) и основного металла (ОМ) исследованных сплавов ВЖЛ12Э, ЖСЗЛС-М и ЖСЗЛС.

Исследования микроструктуры образцов проводились на нетравленных и травленных микрошлифах на световом оптическом микроскопе «Olympus IX-70» с цифровой видеокамерой «ExwaveHAD color video camera Digital Sony» при разных увеличениях.

Микроструктуру исследовали с помощью травления поверхности шлифов реактивом Марбле (CuSO₄ – 4 г, HCl – 20 мл, вода – 20 мл) по режиму: травление 10–15 секунд, промывка водой, сушка горячим воздухом.

Для выявления эвтектики $\gamma + \gamma'$ и γ' - фазы использовался реактив CuSO₄ – 20 г, H₂SO₄ – 5 мл, остальное – H₂O, плотность тока – 500 А/м². Для выявления карбидов, использовался реактив NaF – 30 г, HCl – 100 мл, лимонная кислота – 100 г, H₂O – 1000 мл, плотность тока – 200 А/м². Для идентификации σ - и μ - фаз, а также карбидов типа Me₂₃C₆ и Me₆C, имеющих сходную пластинчатую и игольчатую морфологию, проводили цветное травление с помощью реактива: красная кровяная соль – 10 г, NaOH – 10 г, H₂O – 100 мл, плотность тока 500 А/м².

Микроанализ выполнялся на шлифах, изготовленных в поперечных сечениях образцов (темплетов) исследованных сплавов ВЖЛ12Э, ЖСЗЛС-М и ЖСЗЛС. Исследуемые сечения шлифов совпадают с зонами сварного шва и фонового свечения в зонах термического влияния.

Толщина всех образцов (темплетов) в зоне разделки под сварку составляла ~ 2,0...2,5 мм. При микроанализе установлено, что в основном материале образцов

(темплетов) всех исследованных сплавов литейные дефекты не выявлены. Сварные швы имеют четкую сформированную границу с проникновением в основной материал.

Анализ результатов

Известно [2, 6–9, 14, 15], что возможность образования термических трещин в жаропрочных никелевых сплавах оценивается в зависимости от содержания алюминия (Al), титана (Ti) и количества выделившейся γ' - фазы ($V\gamma'$), которая в наибольшей степени влияет на уровень образующихся остаточных температурных напряжений.

Для сравнительной оценки свариваемости жаропрочных никелевых сплавов на рис. 1 приведена диаграмма, которая предусматривает разделение сплавов на три группы: хорошо, удовлетворительно и плохо свариваемые. Поскольку главную роль в упрочнении жаропрочных никелевых сплавах (ЖНС) играет γ' - фаза, содержание которой в современных сплавах превышает 50 % по массе, то это определяет сложности при их сварке плавлением, т. е. методом аргонодуговой сварки.

К первой группе можно отнести промышленный литейный свариваемый коррозионностойкий никелевый сплав ЖСЗЛС с содержанием алюминия 2,5–3,0 % при граничном условии 2,7 %, титана 2,5–3,0 % при граничном условии 3,6 %, что соответствует количеству γ' - фазы 38–40 %. Сплав не склонен к образованию термических трещин (рис. 1, зона I).

Во вторую группу входит разработанный на основе промышленного сплава ЖСЗЛС литейный свариваемый коррозионностойкий сплав ЖСЗЛС-М с повышенной жаропрочностью, в котором содержание алюминия 2,5–3,5 % при граничном условии 2,7 %, титана 2,5–3,5 % при граничном условии 3,6 %, что соответствует 42–46 % γ' - фазы, но не более 50 %. Сплав не обладает склонностью к образованию термических трещин (рис. 1, зона II).

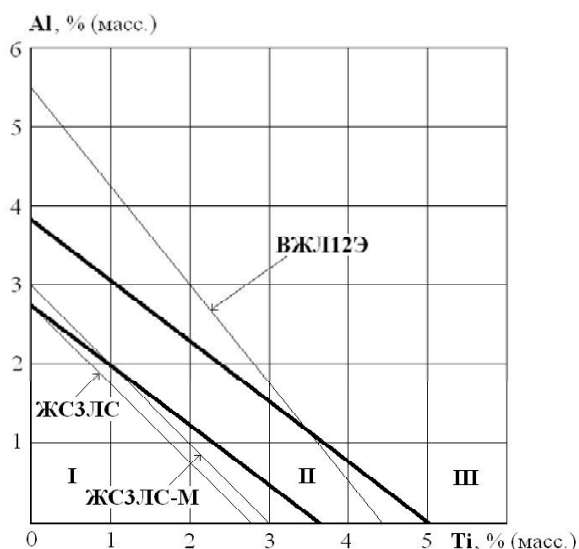


Рис. 1. Диаграмма для оценки склонности жаропрочных никелевых сплавов к образованию термических трещин (зона I-III соответственно, сплав не склонный, с умеренной склонностью, с высокой склонностью к образованию трещин)

К третьей группе относится литейный жаропрочный не коррозионностойкий никелевый сплав ВЖЛ12Э с высокой склонностью к образованию термических трещин с содержанием алюминия (5,0–5,7 %) при граничном условии 2,7 %, титана – (4,2–4,7 %), при граничном условии 3,6 %, что соответствует количеству γ' - фазы 58–62 %, что значительно превышает 50 % (рис. 1, зона III, рис. 2).

Исследование свариваемости проведено методом аргодуговой сварки (АДС) на образцах-темплетах сплавов ВЖЛ12Э, ЖС3ЛС-М и ЖС3ЛС в литом состоянии двумя видами присадочных материалов: опытным сплавом ЖС3ЛС-М (электроды \varnothing 1,8мм) и серийной присадочной проволокой марки ЭП367.

На рисунках 2–4 представлен внешний вид зоны сварного шва. При сварке образцов-темплетов сформировался плотный сварной шов, дефекты типа непровар не выявлены. При внешнем осмотре сварных темплетов сплава ВЖЛ12Э (рис. 2) в ультрафиолетовом свете в зоне сварного шва выявлены поперечные и продольные трещины, а также групповые точечные свечения пенетранта, на образцах опытного сплава ЖС3ЛС-М и промышленного ЖС3ЛС – свечения единичные (рис. 3, 4).

На рисунке 2 показано индикаторное распределение дефектов в сварном шве под лампой УФС при контроле зоны сварки образцов-темплетов промышленного сплава ВЖЛ12Э. На образце-темплете сплава ВЖЛ12Э (рис. 2, а) сварной шов сформирован серийным присадочным материалом ЭП367. Ширина сварного шва – составляет $\sim 4 \dots 6$ мм. По сварному шву выявлено две сварочные трещины. Трещины извилистые и окисленные, протяженностью $\sim 4 \dots 6$ мм.

На рисунке (рис. 2, б) представлен внешний вид сварного шва на образце- темплете сплава ВЖЛ12Э, который сформирован опытным присадочным материалом ЖС3ЛС-М. Ширина сварного шва – составляет $\sim 4 \dots 6$ мм. Видно, что на поверхности образца-темплета в зоне сварного шва наблюдается групповое точечное свечение из-за скопления пор. На образце (темплета) сплава ВЖЛ12Э поверхности в зоне сварного шва выявлены скопления пор диаметром $\sim 0,1 \dots 0,5$ мм.



а



б

Рис. 2. Внешний вид поверхности образцов-темплетов после сварки промышленного литейного жаропрочного не коррозионностойкого сплава ВЖЛ12Э: а – трещины в сварном шве (присадка ЭП367); б – групповое свечение в зоне сварки (присадка ЖС3ЛС-М)



а



б

Рис. 3. Внешний вид поверхности образцов-темплетов после сварки опытного литейного свариваемого жаропрочного коррозионностойкого сплава ЖС3ЛС-М с повышенными механическими свойствами (на уровне промышленного сплава ВЖЛ12Э): а – единичные точечные свечения в сварном шве (присадка ЭП367); б – единичные точечные свечения в сварном шве (присадка ЖС3ЛС-М)

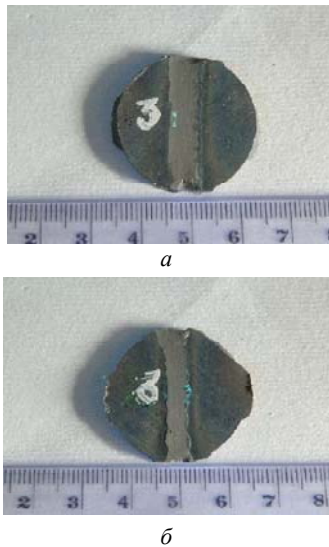


Рис. 4. Внешний вид поверхности образцов-темплетов после сварки промышленного литейного свариваемого жаропрочного коррозионностойкого сплава ЖСЗЛС: *a* – единичные точечные свечения в сварном шве (присадка ЭП367); *б* – единичные точечные свечения по границе сварного шва (присадка ЖСЗЛС-М)

При микроанализе зоны сварки образцов-темплетов исследованного промышленного сплава ВЖЛ12Э, выявлены сварные трещины (рис. 5). Установлено, что трещины развиваются как по сварному шву, так и по границе сварного шва. Трещины имеют извилистую морфологию.

В сечении шлифа выявлены множественные трещины, имеющие выход как на поверхность образца (темплета) (рис. 5), так и внутренние трещины в металле, без выхода на поверхность (рис. 6). Все трещины извилистые и окисленные, в основном развиваются по границам зерен.

Следует отметить, что трещины образуются в образцах-темплетах сплава ВЖЛ12Э при сварке обеими видами присадочных материалов (ЭП367, ЖСЗЛС-М) как по сварному шву, так и по границе сварного шва. Протяженность трещин составляет ~ 0,1...0,5 мм и более.

В зоне границы сварного шва и в зоне термического влияния в основном материале выявлены внутренние трещины, не выходящие на наружную поверхность образца (рис. 6). Трещины извилистые и окисленные. Протяженность трещин составляет ~ 0,1...0,5 мм.

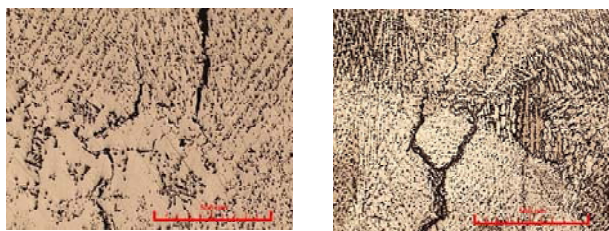


Рис. 5. Трещины, выходящие на внешнюю поверхность по границе сварного шва и зоны термического влияния в сварных образцах-темплетах сплава ВЖЛ12Э: × 50

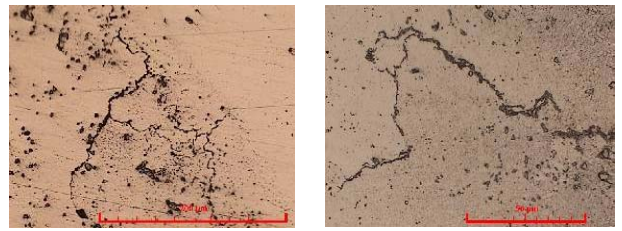


Рис. 6. Внутренние трещины по границам зерен в сварных образцах- темплетах сплава ВЖЛ12Э

Микроструктура образцов-темплетов на границе сварного шва, сформированная в сплаве ВЖЛ12Э опытной присадкой ЖСЗЛС-М (рис. 7) неоднородная, на границах зерен наблюдаются грубые эвтектические выделения. В зоне сварки в теле зерен наблюдается равномерно выделившиеся мелкие частицы упрочняющей γ' - фазы.

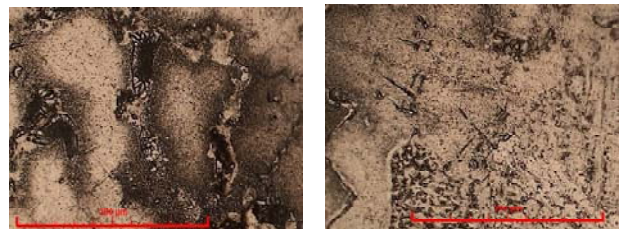


Рис. 7. Микроструктура промышленного сплава ВЖЛ12Э без ТО, сформированная в зоне сварки опытной присадкой ЖСЗЛС-М: × 100

Микроструктура образцов-темплетов, сформированная в сплаве ВЖЛ12Э серийной присадкой ЭП367 (рис. 8) на границе сварного шва также неоднородная, но менее грубая. В зоне сварного шва и околшовной зоне карбиды заметно мельче, чем в основном металле. Выделившихся частиц упрочняющей γ' - фазы не наблюдается.

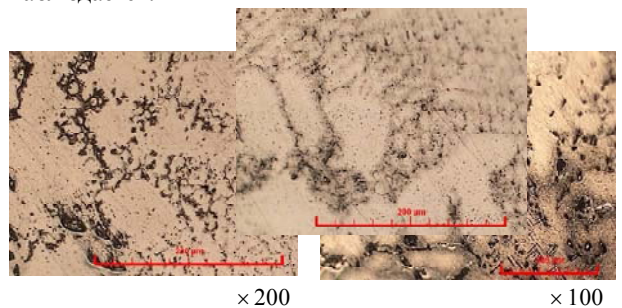


Рис. 8. Микроструктура промышленного сплава ВЖЛ12Э без ТО, сформированная в зоне сварки серийной присадкой ЭП367

При микроанализе зоны сварки образцов (темплетов) исследованного промышленного литейного свариваемого коррозионностойкого сплава ЖСЗЛС, сварные трещины не выявлены, при сварке двумя видами присадочных материалов (опытным сплавом ЖСЗЛС-М; серийным марки ЭП367) (рис. 9, 10).

Микроструктура образцов-темплетов на границе сварного шва, сформированная в сплаве ЖСЗЛС опытной присадкой ЖСЗЛС-М (рис. 9) также, как и у сплава ВЖЛ12Э неоднородная, на границах зерен наблюдаются грубые эвтектические $\gamma + \gamma'$ выделения. В теле зерен также наблюдаются крупные выделения частиц упрочняющей γ' - фазы.

Микроструктура образцов-темплетов, сформированная в сплаве ЖСЗЛС серийной присадкой ЭП367 (рис. 10) на границе сварного шва достаточно грубая и неоднородная. По границам зерен наблюдаются более крупные выделения эвтектики $\gamma + \gamma'$ и карбидов. В зоне сварного шва и околошовной зоне карбиды имеют приблизительно одинаковый размер и морфологию, в сравнении с карбидами в основном металле. В зоне сварки, в теле зерен не наблюдается выделений частиц упрочняющей γ' - фазы.

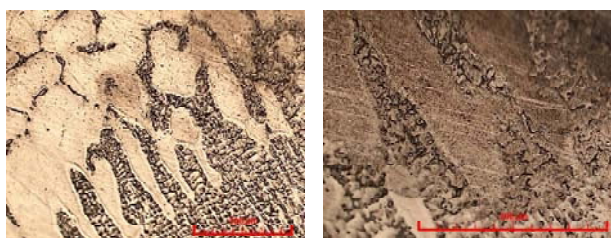


Рис. 9. Микроструктура промышленного сплава ЖСЗЛС без ТО, сформированная в зоне сварки опытной присадкой ЖСЗЛС-М: $\times 200$: *a* – микроструктура в зоне сварного шва; *б* – микроструктура на границе сварного шва

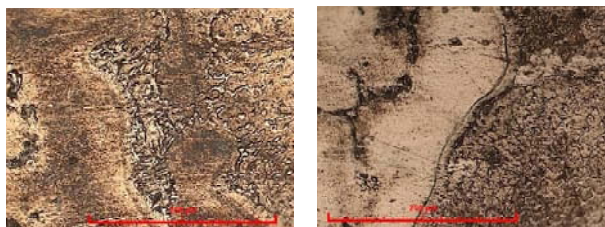


Рис. 10. Микроструктура промышленного сплава ЖСЗЛС в зоне сварки, сформированная серийной присадкой ЭП367 (без ТО): $\times 200$: *a* – микроструктура в зоне сварного шва; *б* – микроструктура на границе сварного шва

При микроанализе зоны сварки образцов-темплетов исследованного опытного сплава ЖСЗЛС-М, сварные трещины не выявлены при сварке двумя видами присадочных материалов (опытным-ЖСЗЛС-М; серийным-ЭП367) (рис. 11, 12).

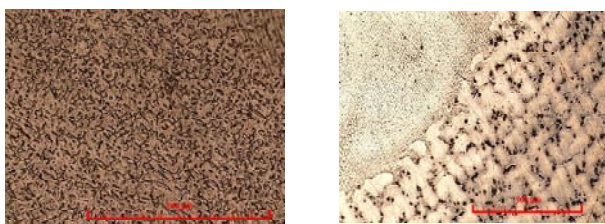


Рис. 11. Микроструктура опытного сплава ЖСЗЛС-М без ТО, сформированная в зоне сварки опытной присадкой ЖСЗЛС-М: $\times 200$: *a* – структура в зоне сварного шва; *б* – структура на границе сварного шва

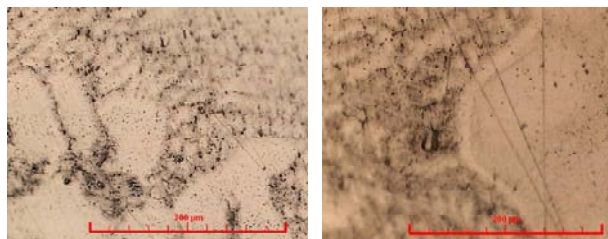


Рис. 12. Микроструктура опытного сплава ЖСЗЛС-М без ТО, сформированная в зоне сварки серийной присадкой ЭП367: $\times 200$: *a* – структура в зоне сварного шва; *б* – структура на границе сварного шва

Микроструктура образцов-темплетов в зоне сварного шва, сформированная в опытном сплаве ЖСЗЛС-М опытной присадкой ЖСЗЛС-М (рис. 11, *a*) мелко дендритная и однородная с равномерным выделением γ' - фазы и карбидной фазы. На границе сварного шва микроструктура имеет заметный переход – наблюдается достаточно однородная, но более крупная дендритная структура, в междендритных пространствах располагаются карбидные частицы сферической морфологии, грубые эвтектические выделения не наблюдаются. В зоне сварного шва и околошовной зоне карбиды заметно мельче, чем в основном металле, при этом карбиды выделяются равномерно. В зоне сварного шва наблюдаются равномерно выделившиеся мелкодисперсные частицы γ' - фазы (рис. 11, *б*).

Микроструктура образцов-темплетов опытного сплава ЖСЗЛС-М в зоне сварного шва и на границе сварного шва, сформированная серийной присадкой ЭП367, имеет также ярко выраженную границу перехода (рис. 12). Микроструктура в зоне сварного шва (рис. 12, *a*) мелко дендритная и достаточно однородная, наблюдается незначительное выделение частиц γ' - фазы и карбидов.

На границе сварного шва микроструктура однородная, но более крупно дендритная структура, грубые выделения эвтектического происхождения не наблюдаются. В зоне сварного шва и околошовной зоне карбиды несколько мельче, чем в основном металле, при этом карбиды выделяются достаточно равномерно. В зоне сварного шва выделившихся мелкодисперсных частиц γ' - фазы не наблюдаются (рис. 12, *б*).

Выводы

1. Сварка методом АДС образцов-темплетов промышленного сплава ВЖЛ12Э двумя видами присадочных материалов: опытным составом ЖСЗЛС-М и серийной присадочной проволокой ЭП367 показала, что сплав несвариваемый, в обоих случаях в зоне сварного шва выявлены внешние и внутренние трещины, а также групповые поры, выходящих на поверхность.

2. Сварка образцов-темплетов опытного сплава ЖСЗЛС-М и промышленного сплава ЖСЗЛС двумя видами присадочных материалов показала, что сплавы обладают одинаковым уровнем свариваемости, в обо-

их случаях в зоне сварки не выявлено трещин и дефектов типа групповых пор. На поверхности наблюдаются единичные поры.

3. Сравнительные исследования свариваемости сплавов показало, что худшей свариваемостью обладает промышленный литейный жаропрочный не коррозионно-стойкий сплав ВЖЛ12Э. Свариваемость опытного сплава ЖСЗЛС-М, находится на уровне промышленного литейного свариваемого коррозионно-стойкого сплава ЖСЗЛС. При этом прочностные характеристики опытного литейного свариваемого коррозионно-стойкого сплава ЖСЗЛС-М существенно выше, чем у сплава ЖСЗЛС и находятся на уровне сплава ВЖЛ12Э.

Список литературы

1. Шоршоров М. Х. Горячие трещины при сварке жаропрочных сплавов / М. Х. Шоршоров, А. А. Ерохин, Т. А. Чернышова. – М. : Машиностроение, 1973. – 224 с.
2. Сорокин Л. И. Свариваемость жаропрочных сплавов, применяемых в авиационных газотурбинных двигателях // Сварочное производство. – 1997. – №4. – С. 4–11.
3. Сорокин Л. И. Классификация жаропрочных никелевых сплавов по их стойкости против образования трещин при термической обработке сварных соединений / Л. И. Сорокин, В. И. Тупикин // Автоматическая сварка. – 1985. – № 5. – С. 23–25.
4. Сорокин Л. И. Свариваемость жаропрочных никелевых сплавов : (обзор). Ч. 2 / Сорокин Л. И. // Сварочное производство. – 2004. – №10. – С. 8–17.
5. Сорокин Л. И. Свариваемость жаропрочных никелевых сплавов в состаренном состоянии / Сорокин Л. И. // Автоматическая сварка. – 1983. – № 7. – С. 12–16.
6. Сорокин Л. И. Сравнительная оценка влияния титана и алюминия на свойства жаропрочного металла, наплавленного аргонодуговым способом / Л. И. Сорокин // Сварочное производство. – 1982. – №4. – С. 22–25.
7. Особенности технологии сварки трением соединений из сплавов ВКНА–25 и ЭП975 / В. И. Лукин, В. Г. Ковальчук, М. Л. Саморуков [и др.] // Сварочное производство. – 2010. – №10. – С. 28–33.
8. Исследование свариваемости литых жаропрочных никелевых сплавов с 6 % алюминия / К.А. Ющенко, Н.И. Пинчук, А.А. Наконечный [и др.] // Автоматическая сварка. – 1985. – № 10. – С. 18–23.
9. Стойкость сварных соединений жаропрочного никелевого сплава типа Хастеллой Н против образования горячих трещин / К. А. Ющенко, В. Н. Липодаев, М. В. Бельчук [и др.] // Автоматическая сварка. – 1986. – № 9. – С. 10–12.
10. Зависимость свариваемости сплавов ЭП693 и ЭП99 от свойств шихтовых материалов, применяемых при их выплавке / [Л. И. Сорокин, В. И. Тупикин, А. М. Ирнин, Н. Я. Зорин] // Автоматическая сварка. – 1984. – № 4. – С. 53–54.
11. Сорокин Л. И. Сравнительная оценка присадочных проволок при аргоно–дуговой сварке жаропрочных сплавов / Л. И. Сорокин, Ю. С. Багдасаров, В. И. Тупикин // Сварочное производство. – 1993. – №10. – С. 31–33.
12. Исследование свариваемости никелевых суперсплавов и разработка технологии ремонта лопаток газовых турбин / [К. А. Ющенко, В. С. Савченко, Л. В. Червякова и др.] // Автоматическая сварка. – 2005. – № 6. – С. 3–6.
13. Сливинский А. А. Структура и свойства сварных соединений жаропрочного сплава на основе никеля / А. А. Сливинский, П. Файт // Автоматическая сварка. – 2003. – №5. – С. 7–13.
14. Характер образования горячих трещин при сварке литых жаропрочных никелевых сплавов / К. А. Ющенко, В. С. Савченко, Н. О. Червяков, А. В. Звягинцева // Автоматическая сварка. – 2004. – № 8. – С. 35–40.
15. Влияние технологических приемов на стойкость сварных соединений никелевых сплавов против образования трещин при термической обработке / Ю. С. Багдасаров, Л. И. Сорокин, Б. Ф. Якушин, С. Ф. Моряшев // Сварочное производство. – 1983. – № 4. – С. 23–26.
16. Сорокин Л. И. Присадочные материалы для сварки жаропрочных никелевых сплавов: (Обзор). Часть 1 / Л. И. Сорокин // Сварочное производство. – 2003. – № 4. – С. 35–40.
17. Сорокин Л. И. Присадочные материалы для сварки жаропрочных никелевых сплавов: (Обзор). Часть 2 / Л. И. Сорокин // Сварочное производство. – 2003. – № 5. – С. 28–31.
18. Сорокин Л. И. Аргонодуговая наплавка бандажных полок рабочих лопаток из высокожаропрочных никелевых сплавов / Л. И. Сорокин // Сварочное производство. – 2004. – №7. – С. 36–39.
19. Сорокин Л. И. Влияние содержания в присадочном материале лантана, церия и рения на свойства жаропрочного металла, наплавленного аргоно-дуговым способом // Сварочное производство. – 1977. – № 10. – С. 9–11.
20. Сорокин Л. И. Заварка трещин с окисленной поверхностью на жаропрочных никелевых сплавах : (обзор) / Л. И. Сорокин // Сварочное производство. – 2004. – № 12. – С. 30–31.
21. Багдасаров Ю. С. Влияние микрохимической неоднородности на околошовное растрескивание сварных соединений никелевых сплавов при дисперсионном твердении / Ю. С. Багдасаров, Б. Ф. Якушин // Сварочное производство. – 1991. – № 8. – С. 37–40.

Одержано 03.06.2015

Гайдук С.В., Петрик І.А., Кононов В.В. Порівняльні дослідження зварюваності ливарних жароміцних нікелевих сплавів

Методом аргонодугової зварки проведена порівняльна оцінка зварюваності ливарних жароміцних нікелевих сплавів ВЖЛІ2Е, ЖСЗЛС і дослідного сплаву ЖСЗЛС-М, з підвищеними характеристиками міцності, двома видами присадних матеріалів, сплавом-основою ЖСЗЛС-М і серійною присадкою марки ЕП367. Приведені порівняльні металографічні дослідження мікроструктури зварних швів і зони термічного впливу.

Ключові слова: ливарні жароміцні нікелеві сплави, присадні матеріали, зварюваність, зварний шов, зона термічного впливу, структура, морфологія фаз.

Gayduk S., Petrik I., Kononov V. Comparative investigation of high-temperature nickel-base cast alloys weldability

By means of argon-arc welding and two kinds of additions, base ЖСЗЛС-М and commercial ЭП367, there has been estimated weldability of high-temperature nickel-base alloys ВЖЛІ2Э, ЖСЗЛС and experimental alloy ЖСЗЛС-М with improved strength properties. Microstructures of welded joints and temperature influenced zones are represented.

Key words: high-temperature nickel-base cast alloys, additions, weldability, welded joint, temperature influenced zone, structure, phase morphology.
