

УДК 621.791.01:548.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНОЙ ЗОНЫ СОЕДИНЕНИЯ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ С ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫМ Cr–Ni НАПЛАВЛЕННЫМ МЕТАЛЛОМ

К. А. ЮЩЕНКО, Ю. Н. КАХОВСКИЙ, А. В. БУЛАТ, Р. И. МОРОЗОВА,
А. В. ЗВЯГИНЦЕВА, В. И. САМОЙЛЕНКО, Ю. В. ОЛЕЙНИК

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Проанализированы причины разрушения ремонтного слоя, выполненного электродами типа Э-08Х20Н9Г2Б на поверхность облицовки из стали Ст.3сп камеры рабочего колеса гидроагрегатов ГЭС. Установлено, что его разрушения (растрескивание, отслоения) возникают вследствие пониженного содержания хрома (менее 12 %) и образования мартенситной фазы в переходной зоне между сталью Ст.3сп и высоколегированным наплавленным металлом. Изучено состояние переходной зоны между Ст.3сп и наплавленным металлом типа Э-10Х25Н13Г2; Э-11Х15Н25М6АГ2 и 10Х28Н14Г2 при вариации $I_{св}$ в диапазоне 80...140 А. Показано, что обеспечить достаточное содержание хрома (не менее 12 %) и отсутствие мартенсита в переходной зоне можно в случае использования для ремонтной наплавки электродов типа 10Х28Н14Г2 при ограничении $I_{св}$ не более 90 А. Библиогр. 6, рис. 5, табл. 1.

Ключевые слова: ручная дуговая сварка покрытыми электродами, низкоуглеродистая сталь, высоколегированный наплавленный металл, переходная зона, структурная и химическая неоднородность, мартенсит, микротвердость, трещины, коррозия

В энергетическом и химическом машиностроении широко применяются сварные соединения разнородных сталей. Их работоспособность в значительной степени определяется состоянием переходной зоны (ее структурной и химической неоднородностью), которая при эксплуатации конструкций в результате воздействия повышенных температур и давления, циклических механических нагрузок, термоциклирования и агрессивных сред претерпевает деградацию и инициирует отслоение металла. Основные закономерности, определяющие неоднородность химического состава и структуры в зоне сплавления разнородных металлов, связывают с появлением прослоек с условным названием «кристаллизационные» [1–4].

На предприятиях нефтехимической промышленности и энергетики проводят ремонтные работы с использованием различных видов дуговой сварки. Так, в гидроэнергетике для поддержания генерирующей мощности агрегатов периодически проводят ремонт повреждений облицовки камер рабочего колеса (КРК) из стали Ст.3сп путем восстановления ее проектных размеров и последующей наплавки на рабочую поверхность высоколегированного кавитационно- и коррозионностойкого слоя металла. Чаще всего наплавку последнего выполняют электродами ЦЛ-11 типа Э-08Х20Н9Г2Б.

В ходе исследований фрагментов разрушенного металла облицовки КРК одного из гидроагрегатов авторами установлено, что разрушение слоя,

наплавленного электродами ЦЛ-11, происходит путем образования трещин, отслоений и коррозии (рис. 1), что обусловлено образованием в переходной зоне между сталью Ст.3сп и высоколегированным металлом мартенситной фазы с микротвердостью 3100...3850 МПа и пониженным содержанием хрома (до 9,1 %) и никеля (до 4,0 %). Согласно работе [5], минимальное содержание хрома, обеспечивающее коррозионную стойкость во влажной атмосфере и различных малоагрессивных растворах, должно быть не менее 12 %.

Таким образом, к металлу переходной зоны должны предъявляться требования достаточной коррозионной стойкости, ограниченного содержания δ -феррита (его избыток может привести к снижению пластичности), а также минимального образования или исключения мартенситной фазы.

Настоящая работа посвящена исследованию возможностей минимизации структурной неод-

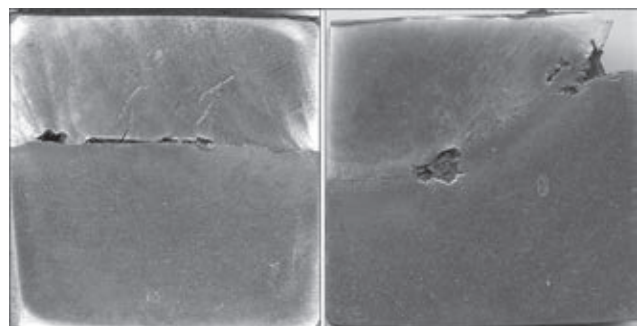


Рис. 1. Типичные картины разрушений переходной зоны между сталью Ст.3сп и наплавленным металлом электродов ЦЛ-11

© К. А. Ющенко, Ю. Н. Каховский, А. В. Булат, Р. И. Морозова, А. В. Звягинцева, В. И. Самойленко, Ю. В. Олейник, 2014

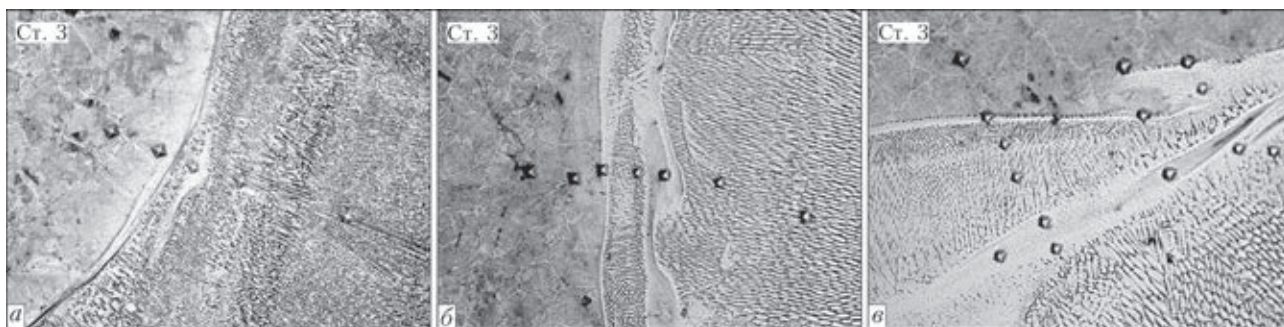


Рис. 2. Микроструктуры ($\times 200$) переходной зоны между сталью Ст.3сп и наплавленным металлом типа Э-10Х25Н13Г2 при $I_{св}$: а — 80...90; б — 100...110; в — 130...140 А

нородности в зоне сплавления за счет вариации состава наплавленного металла и величины сварочного тока. Для этого на пластины из стали Ст.3сп при изменении $I_{св}$ в пределах 80...140 А были выполнены однослойные накладки электродами типа Э-10Х25Н13Г2; Э-11Х15Н25М6АГ2; 10Х28Н14Г2 с различной степенью аустенитности. Металлографические исследования проводили на соответствующих шлифах.

Микротвердость структурных составляющих определяли с помощью металлографического микроскопа ПМТ-3 при нагрузке на индикатор 100 г, количество магнитной фазы – с помощью ферритометра FERRITGEHALT-MESSER 1.053, а микроструктуру металла переходной зоны — с помощью микроскопа НЕОФНОТ-32. Данные о химическом составе металла переходной зоны получали с помощью энергодисперсионного рентгеновского микроанализатора микроскопа «Самскан». Профиль переходной зоны выявляли комбинированным химическим и электролитическим травлением.

На первом этапе работы было установлено, что на всех исследуемых образцах переходная зона имеет волнистый профиль, а ее ширина колеблется в пределах 2...135 мкм, что хорошо согласуется с результатами работы [6].

Микроструктура наплавленного металла электродов типа Э-10Х25Н13Г2 при $I_{св} = 80...90$ А представляет собой аустенит + 5 % феррит и мартенсит (рис. 2, а, таблица), а микротвердость мартенсита в переходной зоне составляет 3250 МПа. При увели-

чении сварочного тока соответственно до 100 и 140 А (рис. 2, б, в, таблица) количество феррита и мартенсита в наплавленном металле повышается, что обусловлено большим проплавлением низкоуглеродистой стали и снижением содержания хрома и никеля соответственно до 9,7 и 5,5 %. При этом микротвердость мартенсита в переходной зоне (таблица) при $I_{св} = 100$ А достигает 3250...3940 МПа, а при $I_{св} = 140$ А — 3310...4140 МПа. Данные о влиянии величины сварочного тока на структуру и микротвердость наплавленного металла и переходной зоны электродов типа Э-11Х15Н25М6АГ2 приведены в таблице и на рис. 3. Согласно приведенным данным следует, что, несмотря на повышенное содержание никеля в переходной зоне, при $I_{св} \geq 100$ А образовалась мартенситная фаза с микротвердостью 3720...3840 МПа. Путем ее микрорентгеноспектрального анализа установлено, что содержание хрома в ней составляет 4,5...8,0 %, а никеля — 7,4...11,3 %. Столь низкое содержание в ней хрома в участках переходной зоны может инициировать в процессе эксплуатации коррозионное разрушение металла. Таким образом, для обеспечения достаточной коррозионной стойкости переходной зоны необходимо повысить здесь содержание хрома. Для проверки приемлемости этого положения исследована переходная зона экспериментальных электродов типа 10Х28Н14Г2. Микроструктура и микротвердость наплавленного металла этих электродов в зависимости от величины сварочного тока приведены на рис. 4 и в таблице. Как видно из таблицы при $I_{св} = 80...90$ А

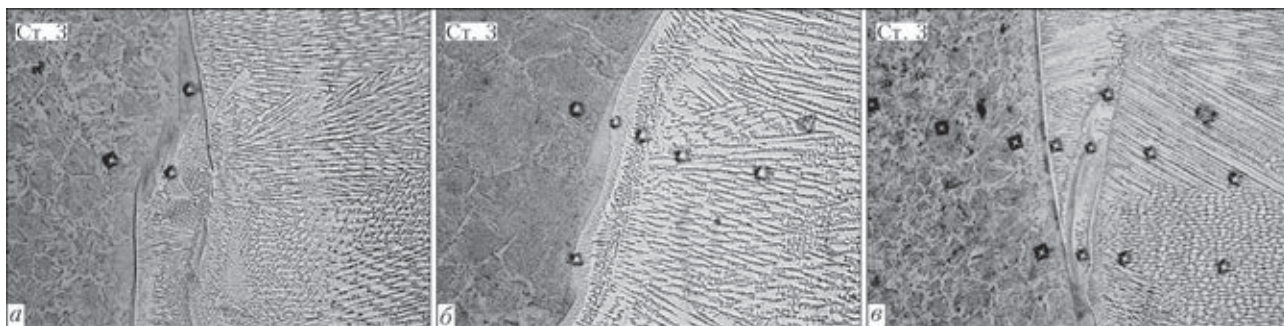


Рис. 3. Микроструктуры ($\times 200$) переходной зоны между сталью Ст.3сп и наплавленным металлом типа Э-11Х15Н25М6АГ2 при $I_{св}$: а — 80...90; б — 100...110; в — 130...140 А

Влияние сварочного тока на структуру и микротвердость наплавленного металла, переходной зоны

Наплавленный металл электродов типа	$I_{св}$, А	Микротвердость, МПа			Микроструктура наплавленного металла
		переходная зона	середина наплавки	верх наплавки	
Э-10Х25Н13Г2	80...90	2180...3250	1980...2080	2250...3110	Аустенит (А) + феррит (Ф)
	100...110	3250...3940	2320...3120	2480...3720	А + Ф
	130...140	3310...4140	2780...3310	2860...3720	А + Ф
Э-11Х15Н25М6АГ2	80...90	2120...3140	2160...2480	2180-2530	А
	100...110	2020...3720	1800...2160	1760...2530	А
	130...140	2160...3840	2120...2780	1975...2080	А
10Х28Н14Г2	80...90	1595...2580	1688...1780	1875...1940	А + Ф
	100...110	1942...3600	1900...2120	1900...2200	А + Ф
	130...140	2380...3840	1971...2080	1800...2080	А + Ф

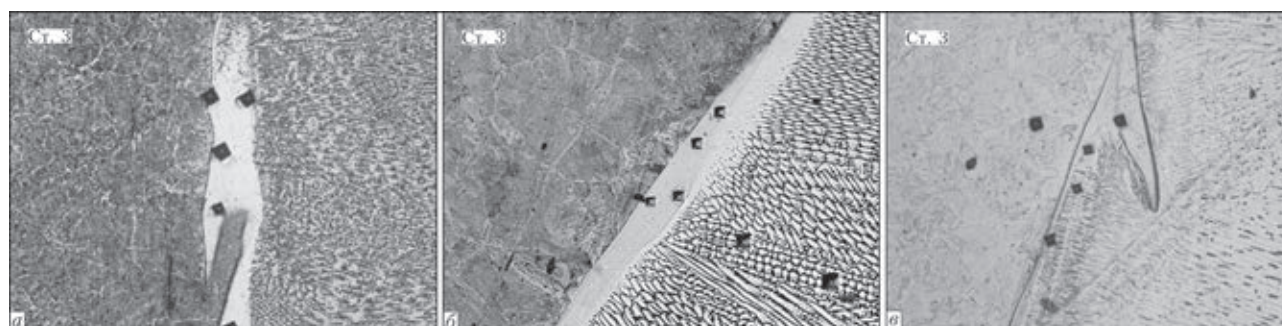


Рис. 4. Микроструктуры ($\times 200$) переходной зоны между сталью Ст.3сп и наплавленным металлом типа 10Х28Н14Г2 при $I_{св}$: а — 80...90; б — 100...110; в — 130...140 А

микротвердость всех участков переходной зоны составила 1595...2580 МПа, кроме одного, протяженностью ~ 40 мкм, где она достигла 3050 МПа. В этом участке с помощью энергодисперсионного анализатора было определено содержание хрома и никеля. Содержание никеля в нем составило 7,85, а хрома — 15,16 %, т. е. микроструктура переходной зоны в этом случае представляет собой аустенит +3,5 % феррита, а содержание хрома вполне достаточно для обеспечения коррозионной стойкости. При увеличении $I_{св}$ до 100...140 А микротвердость в переходной зоне повышается (3600...3840 МПа), а содержание легирующих элементов значительно уменьшается 8,2...12,3 % хрома, 4,8...6,8 % никеля, т. е. наряду с аустенитом здесь образовалась фаза с мартенситной составляющей.

Таким образом, в случае электродов типа 10Х28Н14Г2 повышение сварочного тока более 90 А усиливает структурную и химическую неоднородность металла переходной зоны, что может вызвать снижение его пластичности и корро-

зионной стойкости. Обобщенная картина влияния типа наплавленного металла и величины сварочного тока на количество мартенсита в переходной зоне приведена на рис. 5. Сравнительный анализ результатов металлографического, дюротрического и микрорентгеноспектрального анализа показывает, что при наплавке электродами типа Э-10Х25Н13Г2 на сталь Ст.3сп в металле переходной зоны образуется мартенситная структура, а содержание хрома становится ниже 12 %, что недостаточно для обеспечения коррозионной стойкости. Оптимальным вариантом является использование электродов типа 10Х28Н14Г2 или Э-11Х15Н25М6АГ2, которые при $I_{св} = 80...90$ А обеспечивают наиболее высокое качество металла переходной зоны. Вместе с тем, необходимо отметить, что электроды типа 10Х28Н14Г2 более экономичны (в 1,5 раза дешевле).

При испытаниях образцов металла, наплавленного экспериментальными электродами типа 10Х28Н14Г2 и ЦЛ-11 типа Э-08Х20Н9Г2Б, проведенными на стендах лаборатории гидрогазовых

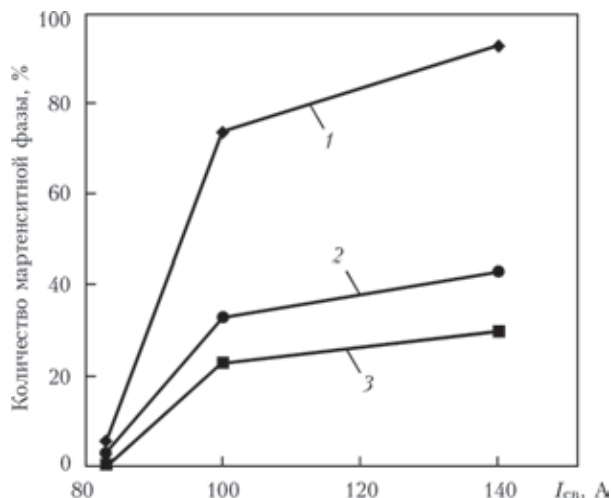


Рис. 5. Количество мартенситной фазы в переходной зоне между сталью Ст.3сп и наплавленным металлом электродов типа Э-10Х25Н13Г2 (1), Э-11Х15Н25М6АГ2 (2), 10Х28Н14Г2 (3)

систем Национального авиационного университета, установлено, что в первом случае кавитационная износостойкость выше в два раза, а гидроабразивная — на 10...15 %.

Выводы

1. Разрушение металла, наплавленного электродами ЦЛ-11 типа Э-08Х20Н9Г2Б на рабочую поверхность облицовки КРК гидроагрегатов из стали Ст.3сп, обусловлено образованием в переходной зоне мартенситной фазы и пониженным содержанием хрома, что инициирует растрескивание и отслоение наплавленного высоколегированного слоя.

2. Методами металлографии, дюротрии и микрорентгеноспектрального анализа исследовано состояние переходной зоны между сталью Ст.3сп и наплавленным металлом электродов типа Э-10Х25Н13Г2, Э-11Х15Н25М6АГ2 и 10Х28Н14Г2 при вариации сварочного тока в пределах 80...140 А. Установлено, что обеспечить достаточную коррозионную стойкость металла переходной зоны и избежать образования здесь мартенситной фазы можно при наплавке электродами типа 10Х28Н14Г2 и ограничении сварочного тока — не более 90 А.

3. Для наплавки кавитационностойкого слоя металла на рабочую поверхность облицовки КРК гидроагрегатов предложено использовать новые сварочные электроды типа 10Х28Н14Г2, обеспечивающие высокое качество и экономичность ремонтно-сварочных работ.

1. *Готальский Ю. Н.* Сварка разнородных сталей. — Киев: Техника, 1981. — 184 с.
2. *Земзин В. Н.* Сварные соединения разнородных сталей. — М.: Машиностроение, 1966. — 232 с.
3. *Машиностроение.* Энциклопедия: В 40 т. Т. III-4. Технология сварки, пайки и резки / В. К. Лебедев, С. И. Кучук-Яценко, А. И. Четверо и др. — М.: Машиностроение, 2006. — 768 с.
4. *Елагин В. П., Гордань Г. Н.* К механизму снижения химической и структурной неоднородности в зоне сплавления аустенитного шва с углеродистой сталью // Сварка и родственные технологии — настоящее и будущее: Сб. тез. стенод. докл. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 2013. — С. 70.
5. *Бабаков А. А., Приданцев М. В.* Коррозионностойкие стали и сплавы. — М.: Металлургия, 1971. — 390 с.
6. *Павлов И. В., Антонец Д. П., Готальский Ю. Н.* К вопросу о механизме образования переходного слоя в зоне сплавления разнородных сталей // Автомат. сварка. — 1980. — № 7. — С. 5-7.

Поступила в редакцию 24.03.2014

ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ДОМ «ПАТОН»

www.patonpublishinghouse.com

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ РЕМОНТА, ВОССТАНОВЛЕНИЯ И РЕНОВАЦИИ. — Киев: Международная ассоциация «Сварка», 2012. — 172 с. Мягкий переплет, 200×290 мм.



Сборник включает 38 статей, опубликованных в журнале «Автоматическая сварка» за период 2009–2011 гг., по проблемам ремонта, восстановления и реновации изделий ответственного назначения. Авторами статей являются известные в Украине ученые и специалисты в области сварки, наплавки, упрочнения, металлизации и других технологий ревитализации. Сборник предназначен для научных сотрудников, инженеров, технологов, конструкторов и аспирантов, занимающихся проблемами сварки и других родственных технологий обработки материалов.

Заказы на книгу просьба направлять
в редакцию журнала «Автоматическая сварка»