

Авиационная и ракетно-космическая техника

УДК 621.791.722

doi: 10.18698/0536-1044-2021-1-41-53

Разработка технологических рекомендаций по повышению качества сварных соединений элементов трубопроводных систем из нержавеющей сталей авиационного назначения

А.С. Кравченко, П.В. Бахматов

Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Development of Technological Recommendations for Improving the Quality of Welded Joints of Pipeline System Elements Made of Stainless Alloys for Aviation Purposes

A.S. Kravchenko, P.V. Bakhmatov

Komsomolsk-na-Amure State University

Вопросам улучшения качества сварных соединений нержавеющей стали посвящено большое количество трудов. Однако, как показывает практика, в отдельно взятом производстве, дефектность может быть достаточно высокой, что можно объяснить его особенностями. На сегодняшний день мало информации об оптимальных режимах аргонодуговой сварки тонкостенных трубопроводных систем из нержавеющей стали. Режимы сварки, приведенные в действующей нормативной документации, не всегда являются актуальными и оптимальными для современного сварочного оборудования. Кроме того, отсутствует модель, с помощью которой можно прогнозировать изменение механических свойств сварного шва в зависимости от параметров сварки. Вследствие этого для каждого нового сплава или сварочного оборудования приходится проводить трудоемкие эксперименты, чтобы определить диапазон параметров, в котором получают наиболее качественные сварные соединения. Исследовано влияние режимов аргонодуговой сварки на структуру и механические свойства сварных соединений элементов трубопроводных систем из тонкостенной нержавеющей стали. Получена линейная регрессионная модель, отражающая зависимость предела прочности таких соединений от режима аргонодуговой сварки. Выработаны технологические рекомендации по изготовлению сварных соединений элементов трубопроводных систем из нержавеющей стали авиационного назначения.

Ключевые слова: нержавеющая сталь, аргонодуговая сварка, дефекты сварного соединения, режим сварки

There is a substantial body of literature on improving the quality of welded joints of stainless steels. However, as practice shows, in a single production facility the level of defects can be quite high, which can be explained by the specifics and features of this production. Currently, there is insufficient information about the optimal modes of argon arc welding of thin-walled stainless steel pipe systems. The welding modes given in the current regulatory documentation are not always relevant and optimal for modern welding equipment. In addition, there is no model to predict the change in the mechanical properties of the weld depending on the welding parameters. This leads to the need to carry out a series of laborious experiments for each new alloy or piece of welding equipment in order to build diagrams that allow you to determine the range of parameters for obtaining the best quality welded joints. This study examines the influence of argon arc welding on the structure and properties of welded joints of thin-walled stainless steel elements of pipeline systems. A linear regression model is obtained that reflects the dependence of the tensile strength of the welded joints on the argon arc welding mode. Technological recommendations for manufacturing welded elements for stainless steel pipeline systems for aviation purposes are developed.

Keywords: stainless steel, argon arc welding, welded joint defects, welding mode

Вопросам улучшения качества неразъемных соединений нержавеющей стали, выполненных сваркой, посвящено большое количество научных работ таких российских и зарубежных исследователей, как Н.И. Каховский, Б.Е. Патон, В.Г. Щербинский, Г.Д. Никифоров, В.В. Редчиц, В.А. Фролов, Д.С. Липпольд и Д.Д. Котеки.

Аустенитные нержавеющие стали считаются хорошо свариваемыми. Однако если не принять предупредительные меры, то можно столкнуться с проблемами свариваемости [1]. Могут возникнуть кристаллизационное и ликвационное растрескивание, трещины в твердом состоянии, межкристаллитная коррозия и коррозия под напряжением, несоответствие химического состава сварного шва (СШ) основному металлу, окисление наружной и внутренней поверхностей СШ, внутренние дефекты в виде пор и непроваров.

Причиной перечисленных дефектов в большинстве случаев является неадекватный выбор присадочного материала, техники и режима дуговой сварки, нарушение культуры производства. Для компенсации элементов, подверженных выгоранию, рекомендуется использовать присадочные проволоки с повышенным содержанием этих элементов [2].

Кроме того, химический состав присадочной проволоки необходимо учитывать при управлении микроструктурой [3]. В работе [1] приведены и проанализированы структурные диаграммы для прогнозирования структуры металла СШ нержавеющей стали (диаграммы Де-Лонга 1956 и 1973 гг.), а также развитые на их основе и широко используемые в настоящее

время в мировой сварочной исследовательской практике диаграммы Исследовательского совета по сварке США WRC-1988 и WRC-1992 [4].

Экспериментально доказано, что режим сварки может влиять на структуру, и, соответственно, на физические и механические свойства [5], стойкость к горячему растрескиванию [6]. Необходимо выбирать правильную технику и режим сварки для обеспечения хорошей защиты расплавленного металла от воздействия воздуха и предотвращения потери его антикоррозионных свойств вследствие активного окисления хрома [3].

Также надо предусмотреть дополнительную защиту обратной стороны СШ от воздействия воздуха. Наличие окисной пленки на внутренней поверхности ответственных конструкций недопустимо [3, 7].

В работе [8] приведены данные о влиянии режима сварки на коррозионные свойства металла сварного соединения (СС). Отрицательное влияние процесса сварки на коррозионную стойкость СС нержавеющей стали 316L является одним из выводов исследований, описанных в статье [9]. Сенсибилизация — вид межкристаллитной коррозии СС нержавеющей стали, методам борьбы с которой посвящена публикация [10].

Увеличение количества аустенитообразующих элементов в присадочной проволоке может повысить стойкость к точечной и щелевой коррозии и коррозии под напряжением, а также увеличить предел прочности СШ нержавеющей стали [11]. Использование активирующих флюсов при сварке сталей позволяет улучшить механические свойства СС и повы-

свить производительность рабочего процесса [12]. Но даже правильный выбор присадочного материала, режима сварки и применение флюсов не гарантируют хорошее качество СС.

Особого внимания требует подготовка присадочного и свариваемого металлов к сварке. Основной причиной порообразования в СШ являются газообразующие вещества, находящиеся в дефектах поверхности основного и присадочного металлов [13]. Резку и зачистку свариваемых кромок следует проводить так, чтобы избежать перегрева и исключить попадание примесей, негативно влияющих на качество СШ [2].

Проведенный анализ литературных источников показал, что несмотря на то, что аргонодуговая сварка — один из самых распространенных и используемых способов соединения нержавеющей стали, вопросы улучшения качества сварных соединений по-прежнему актуальны как в России, так и за рубежом.

Цель работы — снижение уровня дефектности СС и достижение эксплуатационных требований, предъявляемых к СС элементов трубопроводных систем из нержавеющей стали летательных аппаратов.

Методика проведения исследований. Объектом исследования являлись шов и зона термического влияния (ЗТВ) трубных ($\varnothing 50 \times 1$ мм) и плоских ($150 \times 80 \times 1$ мм) образцов из хромоникелевой стали 12X18H10T (рис. 1), полученные ручной аргонодуговой сваркой (далее сварка) на сварочном инверторе Kemppi MasterTig AC/DC 3500W со сварочной горелкой ТТК

350W. Использовали присадочную проволоку Св-06X19H9Т диаметром 1,6 мм. Тип СС — С00001-1620 по ОСТ 1 02617-87. Сварку трубных образцов выполняли в четыре сегмента, плоских — без разделения на сегменты. Программа проведения экспериментов с трубными и плоскими образцами, составленная в соответствии с методикой, описанной в работах [14, 15], приведена в табл. 1.

Геометрические параметры СШ измеряли с помощью комплекта для визуально-измерительного контроля ВИК-1. Наличие внутренних дефектов определяли на рентгенотелевизионном комплексе FILIN-240/225.FP8.C-ARM в соответствии с требованиями инструкции ПИ 1.4.415-92 и ГОСТ 7512-82.

Испытания на статическое растяжение СС выполняли на универсальной испытательной машине INSTRON 3382 по ГОСТ 6996-69. При подготовке образцов для микроструктурных исследований на инвертированном микроскопе Nikon Eclipse MA200 использовали шлифовально-полировальный станок Buehler EcoMet 250 Pro. Химический анализ СС проводили на растровом электронном микроскопе Hitachi S 3400-N.

Микротвердость по Виккерсу в разных зонах СС измеряли на микротвердомере DuraScan EmcoTest согласно ГОСТ 2999-75. Содержание феррита в металле СШ сварных образцов определяли с помощью ферритометра МФ-51НЦ в соответствии с ГОСТ Р 53686-2009. Регрессионный анализ в системе Statistica 10 выполняли в модуле Multiple regression (Множественная регрессия).



а

б

Рис. 1. Внешний вид трубных (а) и плоских (б) образцов

Таблица 1

Программа проведения экспериментов с трубными и плоскими образцами

Номер режима	Сила сварочного тока I , А	Угол заточки электрода, град	Скорость сварки v , мм/мин	Защита корня СШ
1	60/50	45/–	–/240	Нет защиты/Продув аргоном
2	60/60	45/–	–/280	
3	50/70	45/–	–/320	
4	70/50	45/–	–/240	
5	60/50	35/–	–/320	
6	60/70	55/–	–/240	
7	50/70	35/–	–/320	
8	70/–	55/–	–	

Примечание. В числителе дроби указаны значения для трубных образцов, в знаменателе — для плоских.

Результаты исследований и их обсуждение. Для определения влияния параметров процесса сварки на качество СС при изготовлении неповоротных стыков труб из нержавеющей стали авиационного назначения для всех трубных образцов проведены внешний осмотр и измерения наружных дефектов.

Результаты внешнего осмотра и измерения размеров наружных дефектов сварных образцов приведены в табл. 2.

Из табл. 2 следует, что наиболее оптимальными режимами сварки при выполнении неповоротных стыков труб из нержавеющей стали

авиационного назначения являются режимы, соответствующие образцам № 2, 5 и 8.

Анализ результатов внешнего осмотра и измерений позволяет сделать следующие выводы:

- с уменьшением угла заточки электрода увеличивается проплавливающая способность дуги, что связано с повышением степени ее концентрации и, как следствие, с ростом ее тепловой мощности; в результате существенно возрастают ширина и высота корня СШ, ширина усиления практически не изменяется, высота усиления становится меньше;

Таблица 2

Результаты внешнего осмотра и измерения размеров наружных дефектов сварных образцов

Номер режима сварки	Внешний вид		Результаты внешнего осмотра и измерения размеров наружных дефектов при их наличии	Заключение о режиме
	корня СШ	усиления СШ		
1			Сильное окисление корня СШ, неудовлетворительная шероховатость. Наплывы на внутренней поверхности трубы в области корня СШ	Некорректный
2			Нестабильность геометрических параметров СШ, которые все же попадают в допустимый диапазон варьирования	Корректный
3			Непровар корня СШ. Подрез. Нестабильность геометрических параметров СШ. Наружные дефекты СС, требующие доработки и исправления	Некорректный

Окончание табл. 2

Номер режима сварки	Внешний вид		Результаты внешнего осмотра и измерения размеров наружных дефектов при их наличии	Заключение о режиме
	корня СШ	усиления СШ		
4			Неудовлетворительная геометрия СС (отрицательное значение усиления корня СШ). Значительные колебания геометрических параметров СС. Наружные дефекты СС, требующие доработки и исправления	Некорректный
5			Неудовлетворительная геометрия СС (отрицательное значение усиления корня СШ). Образование наплывов в корне СШ. Существенных наружных дефектов СС нет, однако его геометрические характеристики нестабильны на всей протяженности, хотя и попадают в допустимый диапазон варьирования	Корректный
6			Нестабильность геометрических параметров СШ. Существенные наружные дефекты СС отсутствуют, однако его геометрические параметры нестабильны на всей протяженности, имеются участки, где усиление СШ равно нулю или образуется вогнутость, что недопустимо	Некорректный
7			Непровар корня СШ. Отклонение от геометрических параметров СС. Наружные дефекты СС, требующие доработки и исправления	»
8			Незначительные колебания геометрических параметров СС в зоне замка, не требующие исправления или доработки. Наружные дефекты СС, требующие исправления или доработки, отсутствуют	Корректный

• с увеличением силы сварочного тока растет вероятность получения СШ с нестабильной геометрией по длине (что объясняется повышением влияния колебаний длины дуги).

Результаты рентгеноскопического контроля образцов, выполненных при различных режимах сварки, приведены в табл. 3. На основании данных этой таблицы построена гистограмма, отражающая распределение вероятности возникновения внутренних дефектов сварных образцов по режимам сварки (рис. 2). При составлении гистограммы учитывалось общее число валиков, наплавляемых при соответствующем режиме сварки. В каждом режиме сварки выполняли по пять образцов, каждый СШ сплавляли в четыре сегмента. Таким образом, в каждом режиме сварки число валиков составляло 20.

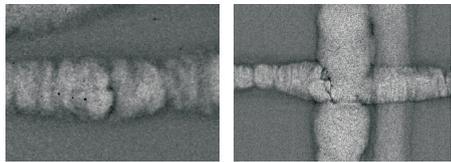
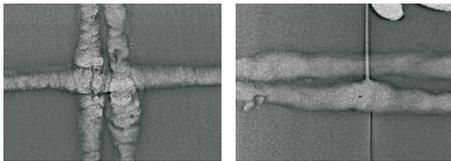
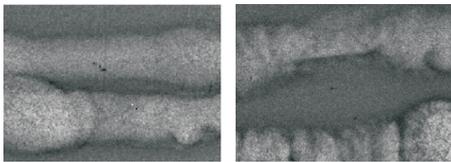
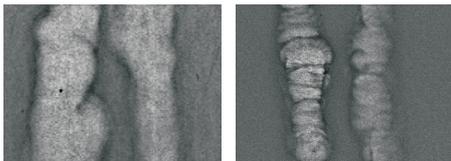
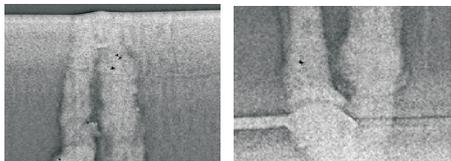
Анализ результатов рентгеноскопического контроля позволяет утверждать следующее:

- при уменьшении угла заточки снижается вероятность возникновения дефектов, что объясняется возрастанием проплавливающей способности и давления дуги на сварочную ванну; это способствует ее более интенсивному перемешиванию и лучшей дегазации;
- при увеличении силы сварочного тока уменьшается вероятность образования пор и непроваров; это связано с повышением тепловой мощности дуги и срока существования сварочной ванны, что способствует ее дегазации.

Из табл. 3 и рис. 2 следует, что оптимальными являются режимы сварки № 4, 5 и 8. С учетом данных визуально-измерительного контроля режимы сварки № 5 и 8 обеспечивают получение бездефектных швов с постоянной и

Таблица 3

Результаты рентгеноскопического контроля образцов, выполненных при различных режимах сварки

Номер режима	Рентгенограммы характерных дефектов	Обнаруженные внутренние дефекты (количество, шт.)	Заключение о годности режима
1		Одиночная пора (5), цепочка пор (1), скопление пор (1), непровар корня СШ (4)	Не годен
2		Одиночная пора (2)	
3		Одиночная пора (2), цепочка пор (1), непровар корня СШ (8)	
4		Не выявлено	Годен
5		Не выявлено	
6		Одиночная пора (2), непровар корня СШ (2)	Не годен
7		Одиночная пора (1), скопление пор (1), непровар корня СШ (4)	
8		Не выявлено	Годен

стабильной геометрией СС. Самыми неблагоприятными являются режимы № 1, 3 и 7, для которых вероятность возникновения внутрен-

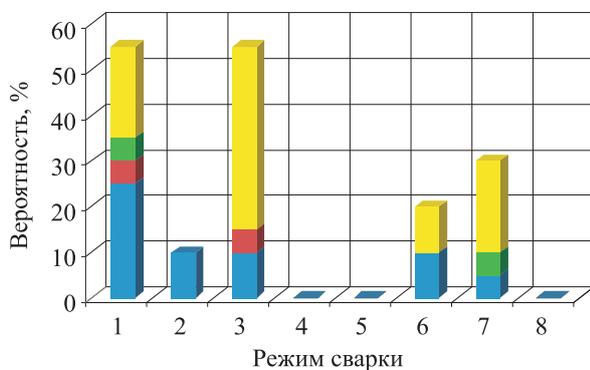


Рис. 2. Распределение вероятности возникновения внутренних дефектов сварных образцов по режимам сварки:

■ — непровар корня СШ; ■ — скопление пор;
■ — цепочка пор; ■ — одиночная пора

них дефектов превышает 25 %. В случае отсутствия защиты корня шва (режим № 1) вероятность возникновения внутренних дефектов (даже при корректных значениях других параметров процесса) составляет 55 %, что недопустимо. К основным дефектам относятся поры разного вида и непровар корня СШ.

Результаты испытания трубных образцов на статическое растяжение с целью определения режимов, благоприятных для сварки, приведены в табл. 4, где ОШЗ — околошовная зона; ОМ — основной металл. Внешний вид плоских образцов после этого испытания показан на рис. 3.

Из табл. 4 следует, что неудовлетворительными являются режимы сварки № 1, 3 и 7. Для этих режимов прочность при статическом растяжении меньше, чем у основного металла более чем на 10 %, что недопустимо согласно

Таблица 4

Результаты испытания трубных образцов на статическое растяжение с целью определения режимов, благоприятных для сварки

Номер режима сварки	Предел прочности, МПа	Среднее значение предела прочности, МПа	Зона разрушения	Уровень прочности относительно ОМ, %	Заключение о статусе режима
1	605...634	620	ОШЗ	-17,30	Неудовлетворительный
2	701...718	710	ОМ	-5,33	Удовлетворительный
3	624...652	638	ОШЗ	-14,93	Неудовлетворительный
4	695...704	700	ОМ	-6,67	Удовлетворительный
5	715...738	727	ОМ	-3,07	
6	662...707	685	ОМ	-8,67	
7	633...684	659	ОМ	-12,13	Неудовлетворительный
8	754...783	767	ОМ	+2,27	Удовлетворительный

Примечание. Прочность при растяжении для ОМ определена экспериментально и составляет 750 МПа.

нормативной документации. Прочность СШ, выполненного без защиты его корня (режим № 1), является самой минимальной и более чем на 17 % ниже, чем у основного металла. Прочность образцов, заваренных при остальных режимах, удовлетворяет требованиям нормативной документации, однако лишь режимы № 5 и 8 можно считать благоприятными. Они позволяют получить СС прочностью, эквивалентной основному металлу.

Анализ результатов испытаний образцов на статическое растяжение позволяет сделать следующие выводы:

- угол заточки электрода оказывает косвенное влияние на механические свойства СС вследствие изменения характеристик дугового

разряда (концентрации и тепловой эффективности дуги);

- возрастание силы тока одновременно со скоростью сварки дает возможность получить СС с более высокими механическими свойствами.

Результаты металлографического исследования влияния термического цикла сварки на структуру и свойства СС плоских образцов приведены в табл. 5 и на рис. 4, где ЗСК — зона столбчатого кристаллита. Объектом металлографического исследования являлись характерные зоны СС: СШ, зона сплавления (ЗС), ЗТВ и ОМ.

Из табл. 5 и рис. 4 следует, что образец № 3 имеет более благоприятную структуру (наи-



Рис. 3. Внешний вид плоских образцов после испытания на статическое растяжение

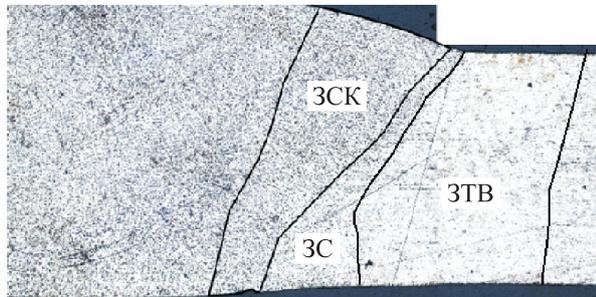
Таблица 5

Результаты анализа микроструктуры сварных образцов

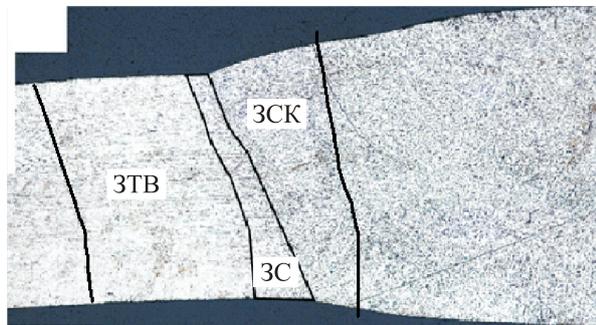
Номер образца	Режим сварки		Площадь, мм ²			Наибольший размер зерна в ЗС, мм
	I, А	v, мм/мин	ЗСК	ЗС	ЗТВ	
1	50	240	0,50	0,170	0,71	0,0250
2	60	280	0,35	0,145	0,76	0,0210
3	70	320	1,36	0,126	0,72	0,0200

меньшие площади ЗС и ЗТВ, а также наименьший размер зерна в ЗС) [16].

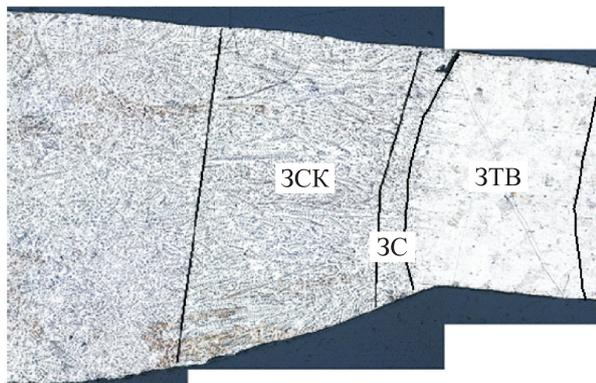
На основании данных химического анализа образцов построены графики, отражающие содержание основных легирующих элементов (хрома, никеля, титана) в сечении СШ первого, второго и третьего образцов (рис. 5).



а



б

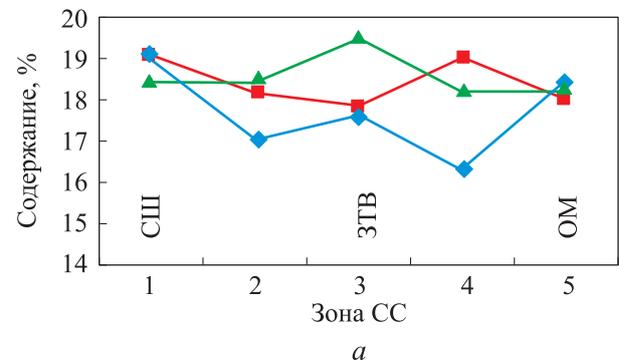


в

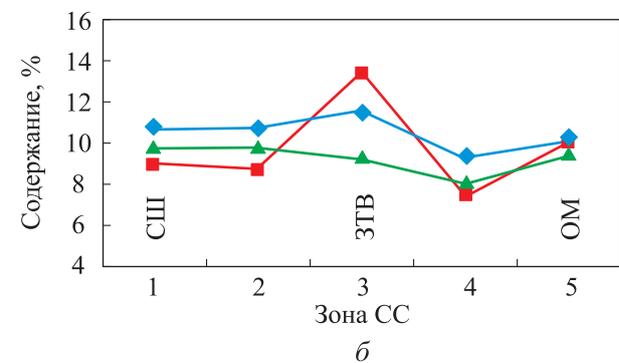
Рис. 4. Характерные зоны первого (а), второго (б) и третьего (в) образцов

Анализ графиков, приведенных на рис. 5, позволяет заключить следующее:

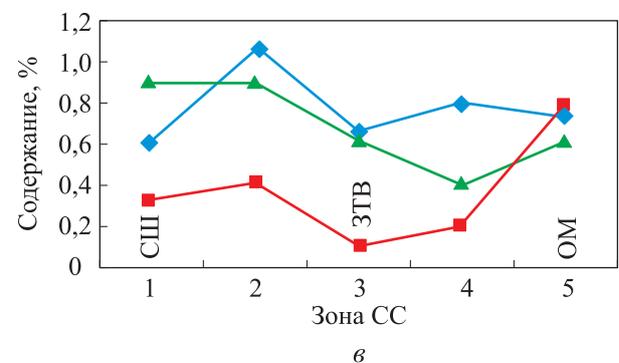
- среднее содержание легирующих элементов во всех СС эквивалентно либо больше, чем в основном металле; это свидетельствует о том, что сварка выполнена с хорошей защитой корня СШ и лицевой поверхности;



а



б



в

Рис. 5. Содержание основных легирующих элементов в сечении СШ первого (♦), второго (■) и третьего (▲) образцов: а — хрома; б — никеля; в — титана

• сварка при большей силе тока и скорости обуславливает достаточно интенсивное протекание диффузионных процессов, что приводит к выравниванию химического состава и снижает ликвацию; СС образца № 3 имеет более рав-

номерное распределение легирующих элементов по сечению СШ.

Результаты измерения микротвердости СС, отражающие ее распределение по сечению СШ, приведены на рис. 6.

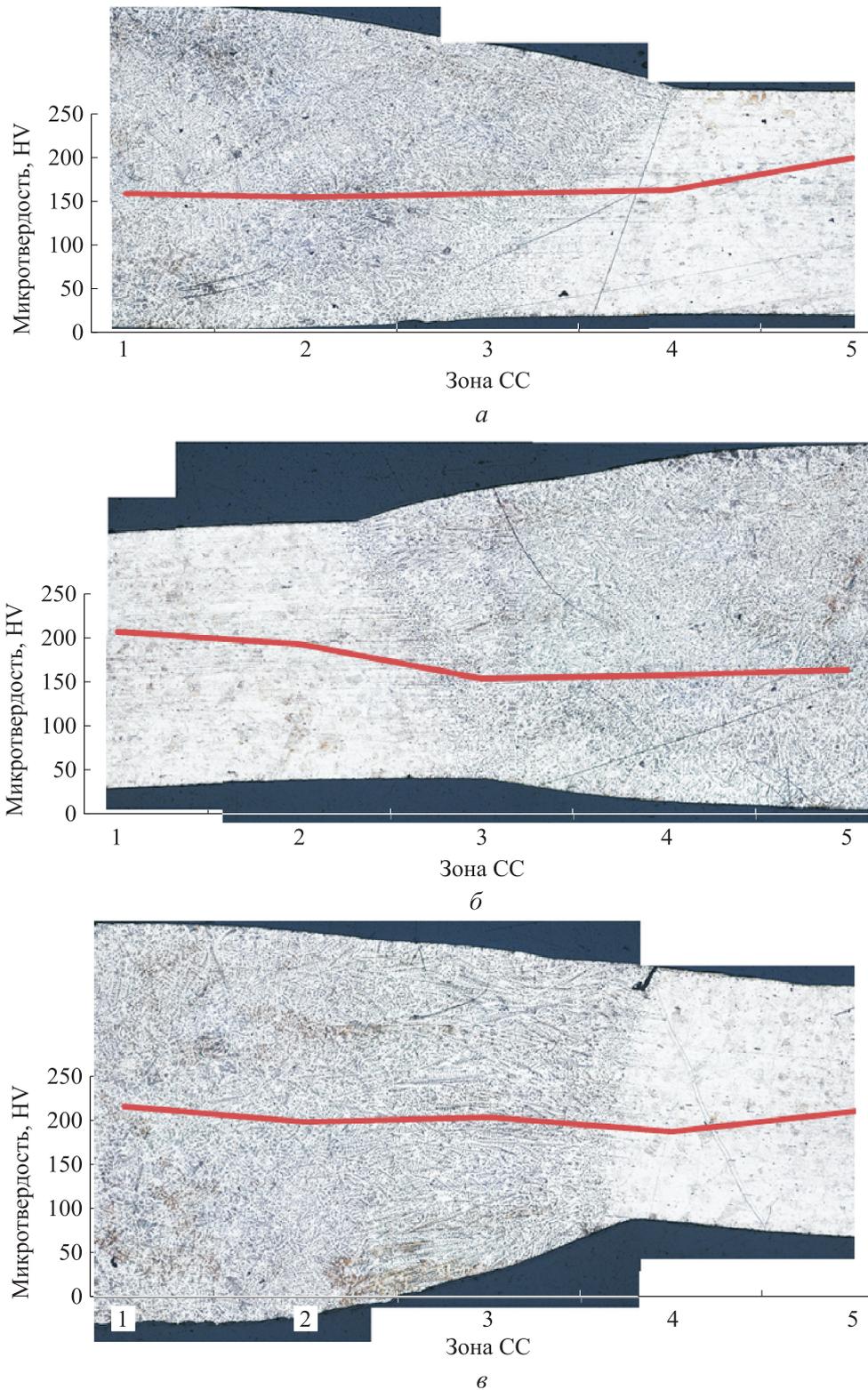


Рис. 6. Распределение микротвердости по сечению СШ первого (а), второго (б) и третьего (в) образцов

Таблица 6

Среднее содержание феррита в металле СС

Номер СС	Режим сварки		ССФ, %
	I, А	v, мм/мин	
1	50	240	2,58
2	70	240	2,52
3	50	320	3,00
4	70	320	2,70

Как видно из рис. 6, образцам № 1 и 2 присуща прочностная неоднородность: механические свойства СШ, а также ЗТВ ниже, чем у основного металла. Образец № 3 имеет более высокие и равномерные значения микротвердости по сечению СШ. Результаты замера микротвердости подтверждают данные микроструктурного и химического анализа.

Содержание феррита в металле СШ аустенитной стали является индикатором характера его кристаллизации и связанной с ним стойкостью к растрескиванию [17].

Результаты исследования влияния режимов сварки на среднее содержание феррита (ССФ) в металле СС приведены в табл. 6.

Анализ результатов исследования влияния режимов сварки на содержание феррита в металле СС показал следующее:

- режимам с минимальной скоростью сварки соответствует большее содержание феррита;
- с увеличением силы сварочного тока содержание феррита в сварном соединении уменьшается.

Такие результаты можно объяснить различной долей основного и присадочного металлов в СС при использовании различных режимов сварки.

Результаты испытания образцов на статическое растяжение с целью регрессионного анализа приведены в табл. 7.

Анализ данных табл. 7 позволяет заключить, что режим с большими силой тока и скоростью сварки увеличивает прочность и пластичность образцов.

Применение модуля Multiple regression показало сильную и достоверную корреляционную связь между пределом прочности, силой сварочного тока и скоростью сварки:

$$\sigma_b = 397 + 3,05I - 015v.$$

После обобщения результатов исследований определен самый благоприятный режим сварки стали 12Х18Н10Т толщиной 1 мм: диаметр вольфрамового электрода — 2 мм; диаметр присадочной проволоки — 1,6 мм; сила сварочного тока — 68...72 А; напряжение на дуге — 12...14 В; скорость сварки — 300...320 мм/мин; угол заточки вольфрамового электрода — 55°; расход защитного газа через горелку — 8...10 л/мин; защита корня СШ обязательна, при этом расход газа должен обеспечивать полное удаление воздуха из ЗП, не создавая избыточное давление внутри элементов трубопроводных систем для предотвращения выплеска сварочной ванны. Сварку необходимо вести на постоянном токе прямой полярности.

Таблица 7

Результаты испытания образцов на статическое растяжение с целью регрессионного анализа

Номер образца	Режим сварки		Предел прочности, МПа	Среднее значение предела прочности, МПа	Относительное удлинение, %	Среднее значение относительного удлинения, %
	I, А	v, мм/мин				
1	50	240	450	515	12	19
			540		21	
			555		25	
2	50	320	499	500	14	16
			481		16	
			521		19	
3	70	240	556	573	20	26
			548		21	
			614		37	
4	70	320	492	564	21	25
			610		29	
			589		25	

Выводы

1. Для получения качественного СС из нержавеющей стали авиационного назначения обязательна организация защиты корня СШ аргоном.

2. В результате металлографических исследований установлено:

- режим с большой силой тока и скоростью сварки позволяет создать СШ с более благоприятной микроструктурой и равномерным распределением легирующих элементов;

- соединение, выполненное при максимальной силе тока и скорости сварки, имеет более высокие и равномерные значения микротвердости по сечению сварного СШ.

3. Для снижения вероятности образования внутренних дефектов СС, получения стабильной геометрии и достижения прочности СШ, эквивалентной основному металлу, предпочти-

тельно выбирать режим сварки с большей силой тока, увеличивая при этом угол заточки вольфрамового электрода.

4. Получена линейная регрессионная модель, отражающая зависимость предела прочности СС нержавеющей стали 12Х18Н10Т толщиной 1 мм от силы тока и скорости сварки, использование которой облегчит работу исследователей и заводских работников, занимающихся разработкой технологии сварки тонкостенных хромоникелевых аустенитных сталей.

5. Определен самый благоприятный режим сварки, при котором СС не имеет внутренних дефектов, обладает стабильными геометрическими характеристиками на всей протяженности и прочностью при статическом растяжении, эквивалентной основному металлу. При таком режиме термический цикл сварки обеспечивает получение более благоприятной микроструктуры, химической и прочностной однородности СС.

Литература

- [1] Липпольд Д., Котеки Д. *Металлургия сварки и свариваемость нержавеющей сталей*. Санкт-Петербург, Изд-во Политехн. ун-та, 2011. 467 с.
- [2] Титов В.А. Закономерности выбора присадочных материалов при дуговой сварке коррозионноустойчивых сталей. *Национальная металлургия*, 2004, № 4, с. 81–84.
- [3] Масаков В.В., Масакова Н.И., Мельзитдинова А.В. *Сварка нержавеющей сталей*. Тольятти, ТГУ, 2011. 184 с.
- [4] Металлургия сварки и свариваемость нержавеющей сталей. *Сварка и диагностика*, 2012, № 1, с. 18–20.
- [5] Каховский Н.И. *Сварка нержавеющей сталей*. Киев, Техніка, 1968. 312 с.
- [6] Yu P., Thompson K.J., McCarthy J., Kou S. Microstructure Evolution and Solidification Cracking in Austenitic Stainless Steel Welds. *Welding Journal*, 2018, vol. 97(11), pp. 301–314, doi: doi.org/10.29391.97.026
- [7] Taban E., Kaluc E., Aykan T.S. Effect of the Purging Gas on Properties of 304H GTA Welds. *Welding Journal*, 2014, vol. 93(4), pp. 124–130.
- [8] Сараев Ю.Н., Безбородов В.П., Селиванов Ю.В. Влияние режимов ручной дуговой сварки на характер коррозионного разрушения в кислых средах сварных соединений стали 12Х18Н10Т. *Сварочное производство*, 2008, № 4, с. 3–7.
- [9] Dadfar M.R., Fathi M.H., Karimzadeh F., Saatchi A. Effect of TIG welding on corrosion behavior of 316L stainless steel. *Materials letter*, 2007, no. 61, pp. 2343–2346, doi: 10.1016/j.matlet.2006.09.008
- [10] Ramdan R.D., Kariem M.A., Wiriawan F., Suratman R., Widyanto B., Neswan O., Wiriawan R. Mechanical Properties and Microstructure at Stainless Steel HAZ from Dissimilar Metal Welding After Heat Treatment Processes. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 553, no. 012034, doi https://doi.org/10.1088/1757-899X/553/1/012034
- [11] Ming Z., Wang K., Liu Z., Wang W., Wang Y. Effect of the cooling rate on the microstructure and mechanical properties of high nitrogen stainless steel weld metals. *China welding*, 2020, vol. 29(2), pp. 48–52, doi: 10.12073/j.cw.20200221002
- [12] Tseng K.H., Hsu C.Y. Performance of activated TIG process in austenitic stainless steels welds. *Journal of materials processing technology*, 2011, no. 3, pp. 503–512.
- [13] Редчиц В.В., Фролов В.А., Казаков В.А., Лукин В.И. *Пористость при сварке цветных металлов*. Москва, Технология машиностроения, 2002. 488 с.

- [14] Спирин Н.А., Лавров В.В. *Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента*. Екатеринбург, УГТУ-УПИ, 2004. 257 с.
- [15] Цымбал В.П. *Математическое моделирование металлургических процессов*. Москва, Металлургия, 1986. 240 с.
- [16] Гуляев А.П. *Металловедение*. Москва, Металлургия, 1986. 544 с.
- [17] Солнцев Ю.П., Пряхин Е.И. *Материаловедение*. Москва, Химиздат, 2007. 748 с.

References

- [1] Lippol'd D., Koteki D. *Metallurgiya svarki i svarivayemost' nerzhaveyushchikh staley* [Metallurgy of welding and weldability of stainless steels]. Sankt-Petersburg, Politekh. un-t publ., 2011. 467 p.
- [2] Titov V.A Regularities of the choice of additive materials for arc welding of corrosion-resistant steels. *Natsional'naya metallurgiya*, 2004, no. 4, pp. 81–84 (in Russ.).
- [3] Masakov V.V., Masakova N.I., Mel'zitdinova A.V. *Svarka nerzhaveyushchikh staley* [Welding of stainless steels]. Tol'yatti, TSU publ., 2011. 184 p.
- [4] Metallurgy of welding and weldability of stainless steels. *Svarka i diagnostika*, 2012, no. 1, pp. 18–20 (in Russ.).
- [5] Kakhovskiy N.I. *Svarka nerzhaveyushchikh staley* [Welding of stainless steels]. Kiev, Tekhnika publ., 1968. 312 p.
- [6] Yu P., Thompson K.J., McCarthy J., Kou S. Microstructure Evolution and Solidification Cracking in Austenitic Stainless Steel Welds. *Welding Journal*, 2018, vol. 97(11), pp. 301–314, doi: doi.org/10.29391.97.026
- [7] Taban E., Kaluc E., Aykan T.S. Effect of the Purging Gas on Properties of 304H GTA Welds. *Welding Journal*, 2014, vol. 93(4), pp. 124–130.
- [8] Sarayev Yu.N., Bezborodov V.P., Selivanov Yu.V. Impact of the manual arc welding conditions on the corrosive attack pattern in the acidic medium of the steel 12X18H10T welded joints. *Svarochnoye proizvodstvo*, 2008, no. 4, pp. 3–7 (in Russ.).
- [9] Dadfar M.R., Fathi M.H., Karimzadeh F., Saat-shi A. Effect of TIG welding on corrosion behavior of 316L stainless steel. *Materials letter*, 2007, no. 61, pp. 2343–2346, doi: 10.1016/j.matlet.2006.09.008
- [10] Ramdan R.D., Kariem M.A., Wiriawan F., Suratman R., Widyanto B., Neswan O., Wirawan R. Mechanical Properties and Microstructure at Stainless Steel HAZ from Dissimilar Metal Welding After Heat Treatment Processes. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 553, no. 012034, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/553/1/012034>
- [11] Ming Z., Wang K., Liu Z., Wang W., Wang Y. Effect of the cooling rate on the microstructure and mechanical properties of high nitrogen stainless steel weld metals. *China welding*, 2020, vol. 29(2), pp. 48–52, doi: 10.12073/j.cw.20200221002
- [12] Tseng K.H., Hsu C.Y. Performance of activated TIG process in austenitic stainless steels welds. *Journal of materials processing technology*, 2011, no. 3, pp. 503–512.
- [13] Redchits V.V., Frolov V.A., Kazakov V.A., Lukin V.I. *Poristost' pri svarke tsvetnykh metallov* [Porosity during welding of non-ferrous metals]. Moscow, Tekhnologiya mashinostroyeniya publ., 2002. 488 p.
- [14] Spirin N.A., Lavrov V.V. *Metody planirovaniya i obrabotki rezul'ta-tov inzhenernogo eksperimenta* [Methods for planning and processing the results of an engineering experiment]. Yekaterinburg, UGTU-UPI publ., 2004. 257 p.
- [15] Tsymbal V.P. *Matematicheskoye modelirovaniye metallurgicheskikh protsessov* [Mathematical modeling of metallurgical processes]. Moscow, Metallurgiya publ., 1986. 240 p.
- [16] Gulyayev A.P. *Metallovedeniye* [Physical metallurgy]. Moscow, Metallurgiya publ., 1986. 544 p.
- [17] Solntsev Yu.P., Pryakhin E.I. *Materialovedeniye* [Materials science]. Moscow, Khimizdat publ., 2007. 748 p.

Информация об авторах

КРАВЧЕНКО Александр Сергеевич — аспирант кафедры «Авиастроение». Комсомольский-на-Амуре государственный университет (681013, Хабаровский край, Комсомольск-на-Амуре, Российская Федерация, ул. Ленина, д. 27, e-mail: a.kraw4encko2017@yandex.ru).

БАХМАТОВ Павел Вячеславович — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технология сварочного и металлургического производства». Комсомольский-на-Амуре государственный университет (681013, Хабаровский край, Комсомольск-на-Амуре, Российская Федерация, ул. Ленина, д. 27, e-mail: mim@knastu.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Кравченко А.С., Бахматов П.В. Разработка технологических рекомендаций по повышению качества сварных соединений элементов трубопроводных систем из нержавеющей сплавов авиационного назначения. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 1, с. 41–53, doi: 10.18698/0536-1044-2021-1-41-53

Please cite this article in English as:

Kravchenko A.S., Bakhmatov P.V. Development of Technological Recommendations for Improving the Quality of Welded Joints of Pipeline System Elements Made of Stainless Alloys for Aviation Purposes. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2021, no. 1, pp. 41–53, doi: 10.18698/0536-1044-2021-1-41-53

Information about the authors

KRAVCHENKO Aleksandr Sergeevich — Postgraduate, Department of Aircraft Engineering, Komsomolsk-na-Amure State University (681013, Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation, Lenin St., Bldg. 27, e-mail: a.kraw4encko2017@yandex.ru).

BAKHMATOV Pavel Vyacheslavovich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Head of Department, Welding and Metallurgical Production Technology. Komsomolsk-na-Amure State University (681013, Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation, Lenin St., Bldg. 27, (681013, Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation, Lenin St., Bldg. 27, e-mail: mim@knastu.ru).



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышла в свет монография
Г.Э. Ганиной, А.В. Мухина, Ю.А. Островского,
А.П. Яковлевой

«Управление проектами реформирования промышленности»

Рассмотрены стратегия инновационного развития предприятия, реструктуризация и реорганизация предприятия, особенности технического перевооружения. Проанализированы существующие научные и практические подходы в сфере управления проектами к формированию концептуальных проектных решений. Представлен материал по модернизации и совершенствованию производства, описаны проектные ситуации, которые могут служить справочным материалом для технолога и организатора производства.

Для научных работников, аспирантов, студентов высших технических и экономических учебных заведений, а также для всех, кто интересуется современными проблемами управления проектами реформирования промышленности.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru