

Дерябкина Е.С., к.т.н., доцент
Украинская инженерно-педагогическая академия, г. Харьков

ВЛИЯНИЕ ПОГОННОЙ ЭНЕРГИИ СВАРКИ НА СТОЙКОСТЬ ПРОТИВ КРИСТАЛЛИЗАЦИОННЫХ ТРЕЩИН СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛИ 45Л

Исследовано влияние величины погонной энергии сварки на стойкость против кристаллизационных трещин металла шва при автоматической двухслойной сварке в углекислом газе без подогрева стали 45Л. Установлены диапазоны погонной энергии сварки первого и второго слоев, допустимые содержание углерода и скорость охлаждения сварного соединения, исключающие появление кристаллизационных трещин в металле и закалочных структур в зоне термического влияния сварного соединения. Выяснено, что первый слой выполняется на погонной энергии до 6000 Дж/см и служит маловуглеродистой подкладкой (содержание углерода 0,15 – 0,16%), обеспечивая предварительный подогрев сварного соединения до температуры 200 – 250⁰С и отсутствие кристаллизационных трещин; второй слой, выполняемый на погонной энергии до 10000 Дж/см, обеспечивает необходимое тепловложение, исключающее образование закалочных структур в зоне термического влияния сварного соединения стали 45Л. Разработана технология, рассчитаны режимы сварки в углекислом газе без предварительного подогрева стали 45Л толщиной 8 – 16 мм.

Ключевые слова: погонная энергия, кристаллизационные трещины, закалочные структуры, предварительный подогрев, содержание углерода, скорость охлаждения.

Дерябкина Е.С., к.т.н., доцент
Українська інженерно-педагогічна академія, м. Харків

ВПЛИВ ПОГОННОЇ ЕНЕРГІЇ ЗВАРЮВАННЯ НА СТІЙКІСТЬ ПРОТИ КРИСТАЛІЗАЦІЙНИХ ТРІЩИН ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ СТАЛІ 45Л

Досліджено вплив величини погонної енергії зварювання на стійкість проти кристалізаційних тріщин металу шва при автоматичному двошаровому зварюванні у вуглекислому газі без підігріву сталі 45Л. Установлено діапазони погонної енергії зварювання першого і другого шарів, допустимі вміст вуглецю і швидкість охолодження зварного з'єднання, що виключають появу кристалізаційних тріщин у металі та гартівних структур у зоні термічного впливу зварного з'єднання. З'ясовано, що перший шар виконується на погонній енергії до 6000 Дж/см і служить маловуглецевою підкладкою (вміст вуглецю 0,15 – 0,16%), забезпечуючи попередній підігрів зварного з'єднання до температури 200 – 250⁰С і відсутність кристалізаційних тріщин; другий шар виконується на погонній енергії до 10000 Дж/см, забезпечує необхідне тепловкладення, що виключає утворення гартівних структур у зоні термічного впливу зварного з'єднання сталі 45Л. Розроблено технологію, розраховано режими зварювання у вуглекислому газі без попереднього підігріву сталі 45Л товщиною 8 – 16 мм.

Ключові слова: погонна енергія, кристалізаційні тріщини, гартівні структури, попередній підігрів, вміст вуглецю, швидкість охолодження.

INFLUENCE OF HEAT INPUT WELDING RESISTANCE TO CRYSTALLIZATION CRACKS OF STEEL WELDED JOINTS 45L

Welded joints of medium-carbon steels 35L and 45L tend to form hardening structures in the heat affected zone and crystallizational cracks in the weld metal body. The formation of crystallization cracks is caused by contribution of high-carbon base metal in the joint which depends on the amount of welding heat input. The condition for preventing the formation of hardening structures is to ensure the cooling rate of the heat affected zone below the critical value.

In our paper we investigate the effect of welding heat input on resistance to formation of crystallizational cracks of the metal in joints affected with automatic two-layer welding in carbon dioxide of 45L steel. The ranges of welding heat input of the first and second layers and the admissible carbon content and cooling rate of the welded joint that exclude the emergence of crystallizational cracks in the metal and in the hardening structures within the heat-affected zone of the welded joint are determined. Admissible carbon compound in the joint metal should not exceed 0,2%; the cooling rate of the welded joint should not be more than 18 – 19⁰C/s.

The first layer is implemented at the welding heat input up to 6000 J/cm and is serves as a low-carbon backup (0,15 – 0,16% of carbon content) that provides the preliminary heating of the welded joint up to 200 – 250⁰C and absence of crystallizational cracks in the joint metal. The second layer is implemented the welding heat input up to 10,000 J/cm; it provides the necessary heat input, thus eliminating the formation of hardening structures in the heat-affected zone of steel welded joints of 45L steel.

We develop the technology and worked out the welding regimes in carbon dioxide without preheating of 45L steel (8 – 16 mm thick). The dependences of calculated modes are determined and regimes of two-layer welding without preheating of 45L steel (8 – 16 mm thick) are carried out. The latter providing the realization of welded joints without crystallizational cracks within the joint metal and with ferrite-pearlite structure in the heat-affected zone.

The comparative assessment of the strength of welded pipe joints of steel 45L, made basic technology (manual, single-layer welding) and new technology (automatic two-layer welding in carbon dioxide), which showed that the strength of welded joints at two-layer welding in carbon dioxide is 35 – 40% higher than the those obtained via one-pass welding with SSSI-13/45 electrodes.

The new technology is implemented in welding frames of self-propelled chassis Cm-20 with a rear beam and a glass of steel 45L. The durability of the frames has increased 1,5 times, and the endurance limit at 20%. The results of the present studies are recommended for implementation for carbon dioxide welding of gears, sprockets, shafts and other parts made of 35, 40, 45 steel grades.

Keywords: *heat input, crystallizational cracks, hardening structures, preheating, carbon content, cooling rate.*

Введение. При изготовлении сварно-литых конструкций широкое применение находят отливки из среднеуглеродистых сталей 35Л и 45Л повышенной прочности, которые обладают хорошими литейными и механическими свойствами, но имеют ограниченную свариваемость [3]. Сварные соединения этих сталей склонны к образованию закалочных структур в зоне термического влияния и кристаллизационных трещин в металле шва [2, 3]. Образование кристаллизационных трещин обусловлено долей участия высокоуглеродистого основного металла в шве, скорости охлаждения сварного соединения, зависящих от погонной энергии и режимов сварки [5].

Условием предупреждения образования закалочных структур является обеспечение скорости охлаждения зоны термического влияния ниже критической [7, 8].

Эффективным средством повышения стойкости металла шва против образования кристаллизационных трещин и закалочных структур является предварительный подогрев [2, 3, 7], проведение которого затрудняет технологический процесс, увеличивает трудоемкость, резко ухудшает условия труда сварщиков. Это делает подогрев весьма нежелательным, а в большинстве случаев и вообще неприемлемым [7].

Поэтому актуальным является исследование и разработка технологии сварки, обеспечивающей сварные соединения достаточной пластичности без трещин и закалочных структур при исключении предварительного подогрева стали 45Л.

Анализ последних источников исследований и публикаций. Изучению взаимосвязи между составом, структурой и механическими свойствами металла сварных соединений и швов в последние годы уделяется много внимания [1, 2].

Повышенное содержание углерода в стали 45Л (до 0,42 – 0,50%) ухудшает свариваемость этих сталей, так как оно снижает стойкость металла шва к образованию кристаллизационных трещин и делает возможным появление в околошовной зоне малопластичных структур и холодных трещин [3, 5].

Усиление чувствительности швов к кристаллизационным трещинам объясняется тем, что углерод повышает степень дендритной неоднородности распределения серы и способствует выделению ее по границам кристаллитов в виде легкоплавких сульфидных включений, увеличивающих ТИХ [4]. Чтобы получить качественный шов, следует снизить содержание углерода в нем за счет применения соответствующих сварочных материалов и уменьшения доли основного металла в наплавленном [1, 6]. Необходимую равнопрочность шва основного металла получают дополнительным легированием элементами, упрочняющими феррит (марганец, кремний) [3, 6].

Повышенное содержание углерода в этих сталях обуславливает появление мартенсита в околошовной зоне. Для углеродистого мартенсита характерны высокая твердость ($HV > 600$) и хрупкость, объясняемые пластинчатой формой его строения. Протекающее же при низких температурах ($< 350^{\circ}\text{C}$) мартенситное превращение резко повышает уровень внутренних напряжений [5, 7].

Чтобы предотвратить образование малопластичных и хрупких структур при сварке, следует замедлять охлаждение металла, регулируя режим сварки, а если необходимо, предварительно подогревать изделие. В ряде случаев для обеспечения высокой деформационной способности сварного соединения и его равнопрочности с основным металлом после сварки назначают термическую обработку (закалку с отпуском, нормализацию) [2, 8]. Однако конкретные рекомендации на технологический регламент сварки стали 45Л без подогрева отсутствуют. Следовательно, важно исследовать влияние содержания углерода и основных параметров термического цикла сварки на обеспечение склонности металла шва к появлению трещин и закалочных структур в сварных соединениях стали 45Л, выполненных без предварительного подогрева.

Выделение не решённых ранее частей общей проблемы. Ранее не исследовано влияния величины погонной энергии сварки на стойкость против кристаллизационных трещин металла шва, обусловленных долей участия высокоуглеродистого металла, при автоматической двухслойной сварке в углекислом газе без подогрева стали 45Л. Необходимо установить диапазоны погонной энергии сварки первого и второго слоев, допустимые содержание углерода и скорость охлаждения сварного соединения, исключающие появление кристаллизационных трещин в металле и закалочных структур в зоне термического влияния (ЗТВ) сварного соединения. Отсутствует технология и режимы сварки в углекислом газе без предварительного подогрева стали 45Л толщиной 8 – 16 мм.

Постановка задачи. Актуальным является исследование влияния основного параметра термического цикла сварки – величины погонной энергии, которая предопределяет скорость охлаждения на стойкость против кристаллизационных трещин в сварных соединениях стали 45Л в зависимости от содержания углерода в металле шва.

Основной материал и результаты. Исследования осуществлялись на цилиндрических полых образцах диаметром 80 – 150 мм и пластинах размером 450×100 мм толщиной 8 – 16 мм из стали 45Л. Сварные соединения выполняли без подогрева вручную электродами УОНИ-13/45 Ø5 мм и полуавтоматической сваркой в углекислом газе сварочной проволокой Св-08Г2С диаметром 1,2, 1,6 и 2 мм. Из сварных образцов изготавливались микро- и макрошлифы для определения доли участия основного металла, наличия трещин, проведения металлографических исследований и замера твердости. Со средней части шва бралась стружка для проведения химического анализа. Изучалось влияние погонной энергии сварки на долю участия основного металла в шве и переход углерода в шов при одно- и двухслойной сварке в углекислом газе. Термические циклы сварки записывались с помощью хромель-алюмелевых термопар и электродного потенциометра ПРС-1. Фиксировалась скорость охлаждения зоны термического влияния образцов, сваренных с различной погонной энергией.

Результаты химического анализа (табл. 1) показали, что металл шва при сварке в углекислом газе имеет в своем составе больше углерода, чем при сварке электродами УОНИ-13/45. При этом содержание кремния и марганца в металле швов практически одинаково независимо от способа сварки, но значительно меньше, чем в проволоке Св-08Г2С.

Таблица 1 – Химический состав стружки

Место отбора стружки для анализа	Содержание элементов, %					
	C	Mn	Si	P	S	Cr
Сталь 45Л	0,46	0,78	0,55	0,040	0,042	0,12
Шов (сварка в углекислом газе проволокой Св-08Г2С Ø 2 мм)	0,34	1,13	0,50	0,036	0,034	–
Шов (сварка электродами УОНИ-13/45)	0,21	1,08	0,55	0,038	0,032	–
Сварочная проволока Св-08Г2С	0,11	2,12	0,71	0,027	0,035	–

При металлографических исследованиях сварных соединений, выполненных как вручную электродами, так и в углекислом газе, обнаружено, что в обоих случаях в ЗТВ наблюдаются закалочные структуры – мартенсит и игольчатый троостит, а в металле шва имеются кристаллизационные трещины.

Исследования влияния погонной энергии сварки, содержания углерода в металле шва и скорости охлаждения ЗТВ на свойства сварных соединений (табл. 2) показали, что в результате сварки в углекислом газе без предварительного подогрева в металле шва трещины отсутствуют при погонной энергии до 6000 Дж/см и содержании углерода до 0,20%. Однако при этом в ЗТВ образуются закалочные структуры, исключить которые позволяет уменьшение скорости охлаждения до 18 – 19⁰С/с, но при этом в шве наблюдаются кристаллизационные трещины.

Пластичные структуры (феррит и перлит) с твердостью $H_{V30}=200 - 220$ в зоне термического влияния возможно получить при погонной энергии $q/v = 2400$ кал/см, но при этом в сварном шве образуются кристаллизационные трещины, так как $C_{шва} > 0,2\%$. Таким образом, однослойная сварка исследуемых соединений без подогрева неприемлема.

С увеличением погонной энергии доля участия основного металла в шве увеличивается и приводит к образованию кристаллизационных трещин, а скорость охлаждения зоны термического влияния уменьшается, т.е. создаются условия для образования менее напряженных структур, и наоборот.

Таблица 2 – Характеристика сварных соединений

Погонная энергия, Дж/см	Режим сварки		Скорость охлаждения ЗТВ, С/с	Химический состав, %					Структура металла в ЗТВ	Наличие трещин в шве
	$I_{св},$ А	$U_{д},$ В		С	Mn	Si	P	S		
4200	210	22	70	0,16	1,40	0,56	0,030	0,033	Закалочная	Нет
6000	250	24	64	0,18	1,40	0,75	0,032	0,037	Закалочная	Нет
3400	310	30	31,5	0,22	1,37	0,60	0,034	0,04	Закалочная	Есть
10000	340	34	17,5	0,25	1,44	0,59	0,033	0,039	Закалочная	Есть
12500	430	32	7,5	0,31	1,33	0,45	0,034	0,038	Благоприятная	Есть
14650	500	32	3,98	0,32	1,22	0,49	0,034	0,037	Благоприятная	Есть

Это позволило предположить, что существует область режимов, в которой возможно получение сварных соединений со скоростью охлаждения зоны термического влияния и содержанием углерода в металле шва ниже критических, при которых могут быть получены сварные соединения без кристаллизационных трещин в шве и закалочных структур в зоне термического влияния.

Для определения этой области были проведены исследования двухслойной сварки на различной погонной энергии и построены совмещенные графики (рис. 1) зависимостей содержания углерода в металле шва (1с, 2с) и скорости охлаждения ЗТВ (1, 2, 3, 4, 5 и 1', 2', 3', 4', 5') от погонной энергии сварки. Первый слой выполняется на погонной энергии, обеспечивающей отсутствие кристаллизационных трещин, а второй – необходимое тепловложение, исключающее образование закалочных структур.

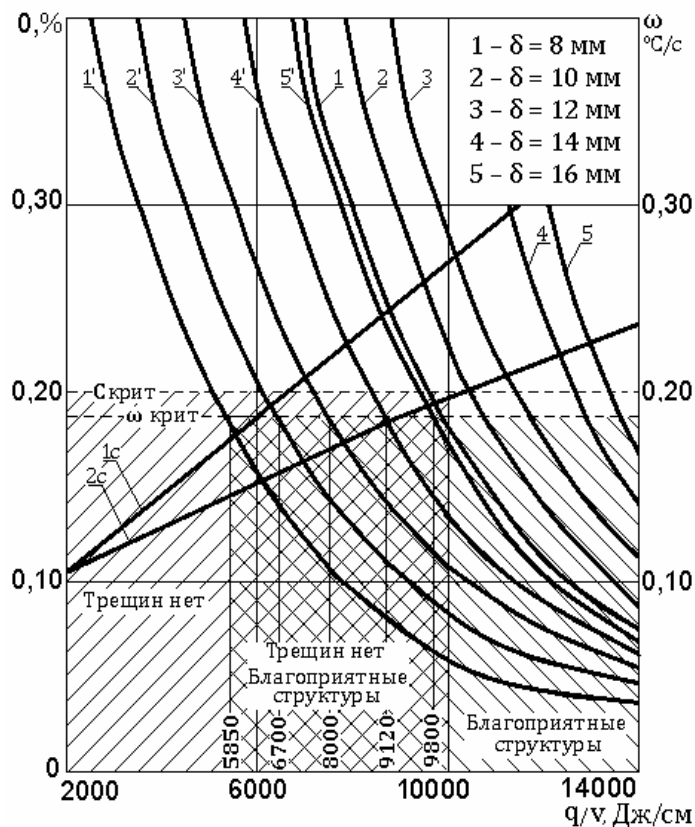


Рисунок 1 – Совмещенные графики зависимостей содержания углерода в металле шва(1с, 2с) и скорости охлаждения зоны термического влияния (1, 2, 3, 4, 5 и 1', 2', 3', 4', 5') при одно- и двухслойной сварке

Первый слой, выполненный на погонной энергии 4000 – 5850 Дж/см, является малоуглеродистой подкладкой ($C_{э\text{кв}} \sim 0,16\%$) и обеспечивает предварительный подогрев зоны термического влияния ($T = 200 - 250^\circ$). Смещение кривых скоростей охлаждения влево при наложении второго слоя обеспечило получение критической скорости охлаждения ЗТВ, при погонных энергиях $q/v = 6000 - 10000$ Дж/см, обеспечивающих получение исследуемых сварных соединений с содержанием углерода в шве 0,15 – 0,20% и скоростью охлаждения зоны термического влияния 16...19 $^\circ\text{C}/\text{с}$, т.е. без кристаллизационных трещин и закалочных структур. В результате математической обработки экспериментальных данных получены зависимости для определения напряжения и тока при двухслойной сварке для первого слоя:

$$U_{Д1} = (0,35 - 0,40)\sqrt{(q/V)V_{св}} \quad (1)$$

$$I_{св1} = (3,0 - 4,0)\sqrt{(q/V)V_{св}} \quad (2)$$

для второго слоя:

$$U_{Д2} = (0,30 - 0,35)\sqrt{(q/V)V_{св}} \quad (3)$$

$$I_{св2} = (3,0 - 3,3)\sqrt{(q/V)V_{св}} \quad (4)$$

где $U_{Д}$ – напряжение дуги, В;

$I_{св}$ – сварочный ток, А;

q/V – погонная энергия сварки, Дж/см;

$V_{св}$ – скорость сварки, см/с.

Зависимости использованы для расчета режимов сварки первого и второго слоёв, обеспечивающих получение сварных соединений из стали 45Л толщиной 8 – 16 мм без кристаллизационных трещин и закалочных структур (табл. 3).

Металл шва (рис. 2, а), выполненного двухслойной сваркой на рекомендованных режимах (табл. 3, 4), имеет дендритное строение, в ЗТВ (рис. 2, в) наблюдается ферритная сетка вокруг перлитных зерен, затем — зона мелкозернистого феррита и перлита, основной металл (рис. 2, г) – ферритно-перлитная структура. Повышение твердости металла ЗТВ, у линии сплавления (рис. 3), не снижает качества сварного соединения.

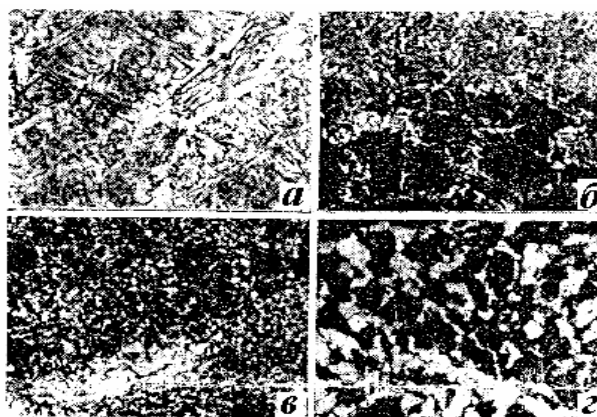
Таблица 3 – Режимы двухслойной сварки (первого слоя) стали 45Л

Толщина металла или катет шва, мм	Тип соединения	Тип шва	1-й слой		
			$I_{св}, A$	$U_{д}, B$	Скорость сварки, м/ч
8 – 10	Стыковое, со скосом одной кромки, угловое	Стыковой	190 – 210	22 – 23	26 – 32
11 – 13	Стыковое, со скосом кромок, угловое	Угловой	210 – 250	23 – 24	24 – 30
14 – 16	Стыковое, со скосом кромок, угловое	Угловой	250 – 300	24 – 26	24 – 30

Экспериментально установлено, что отношение величины тока к величине напряжения, равное 8 – 11, обеспечивает хорошее формирование шва при сравнительно малом разбрызгивании металла и умеренном выгорании раскислителей, а также получение швов с коэффициентом провара 2 – 3. Наиболее рациональным следует считать применение сварочной проволоки диаметром 1,2 мм, обеспечивающей в сравнении с проволоками диаметром 1,6 – 2,0 мм при сварке в диапазоне исследуемых погонных энергий наименьшее содержание углерода и наибольшее – марганца и кремния. Это можно объяснить более активным перемешиванием сварочной ванны и большой скоростью перемещения активного пятна дуги по её переднему фронту [8].

Таблица 4 – Режимы двухслойной сварки (второго слоя) стали 45Л

Толщина металла или катет шва, мм	Тип соединения	2-й слой			Вылет, мм	Расход газа в минуту на слой, л
		$I_{св}, A$	$U_{д}, B$	Скорость сварки, м/ч		
8 – 10	Стыковое, со скосом одной кромки, угловое	270 – 300	27 – 28	26 – 32	16 – 18	8 – 12
11 – 13	Стыковое, со скосом кромок, угловое	290 – 320	28 – 30	24 – 30	18 – 20	12 – 16
14 – 16	Стыковое, со скосом кромок, угловое	320 – 300	30 – 32	24 – 30	20 – 22	14 – 18



**Рисунок 2 – Микроструктура сварного соединения стали 45Л при двухслойной сварке:
а – шов; б – шов и ЗТВ; в – ЗТВ; г – основной металл**

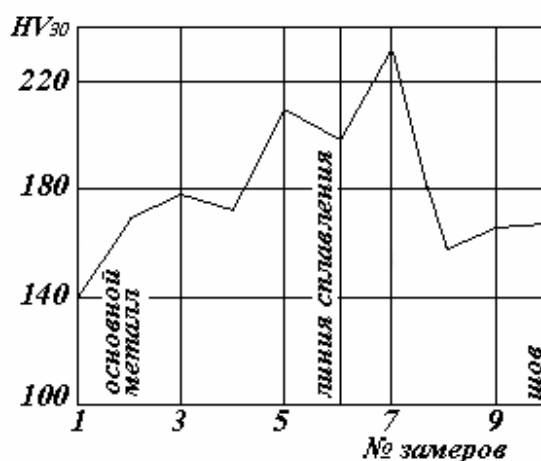


Рисунок 3 – Распределение твердости по зонам сварного соединения стали 45Л при двухслойной сварке

Для оценки сравнительной прочности были изготовлены и испытаны образцы двух видов сварных соединений вала из двух патрубков диаметром 102 мм и толщиной стенки 10 мм из стали 45Л. Образцы первого вида сваривали электродами УОНИ-13/45 в один проход традиционными режимами, а второго вида – полуавтоматической двухслойной сваркой в углекислом газе на рассчитанных режимах. Образцы испытывали при статических и динамических нагрузках на пульсаторе, режимы нагружения которого задавались по манометрам и контролировались наклеенными тензодатчиками. При выбранной схеме нагружения разрушение происходило в зоне сварки или трубы со стаканом, или стакана с корпусом, что соответствовало случаям разрушения, имевшим место в эксплуатации. Наиболее опасное расчетное сечение в испытываемом узле проходит по месту концентрации напряжений. Такие разрушения характерны для нормально выполненных сварных соединений, не имеющих закалочных структур и кристаллизационных трещин. Большинство образцов второй серии разрушилось таким образом. Другие типы разрушений (по стакану в зоне термического влияния и по шву «стакан – корпус») наблюдались в образцах первой серии и были связаны с дефектами сварки.

По два – четыре образца из каждой серии испытывались до разрушения при статической нагрузке с целью предварительной оценки прочности соединений, выполненных по сравниваемым технологиям. Образцы первого вида разрушились по дефектам при нагрузке 10250 – 11500 кг, а второго вида – по месту концентрации напряжений в ЗТВ при нагрузке 14500 – 15830 кг.

Разработанная технология внедрена при сварке рамы самоходного шасси СШ20 с задним брусом и стаканом из стали 45Л, а трубами – из стали 20. Проведены сравнительные испытания усталостной прочности при переменной нагрузке с коэффициентом асимметрии $r = 0,5$ рамы шасси, сваренными по новой (автоматическая двухслойная) и базовой технологиям (ручная однослойная) сварки. Долговечность сварных соединений рам, изготовленных по новой технологии, в 1,4 – 1,5 раза больше, а предел выносливости на 20% выше по сравнению с рамами, изготовленными по базовой технологии.

Выводы. Таким образом, на основании проведенных исследований установлено, что предупредить кристаллизационные трещины в металле шва и закалочные структуры в ЗТВ при сварке стали 45Л возможно при двухслойной сварке в углекислом газе первого слоя на погонной энергии до 6000 Дж/см, а второго слоя на погонной энергии до 10000 Дж/см при скорости охлаждения не более 18 – 19⁰С/с. Критическое содержание углерода в металле шва не должно превышать 0,2%. Определены зависимости и рассчитаны режимы двухслойной сварки без подогрева стали 45Л толщиной 8 – 16мм, обеспечивающие получение сварных соединений без кристаллизационных трещин в металле шва и ЗТВ с ферритно-перлитной структурой.

Прочность сварных соединений при двухслойной сварке в углекислом газе на 35 – 40% выше, чем при однопроходной сварке электродами УОНИ-13/45.

Результаты исследований рекомендуются к внедрению при сварке в углекислом газе шестерен, звездочек, валов и других деталей, изготавливаемых из среднеуглеродистых сталей марок 35, 40, 45.

Литература

1. Патон Б. Е. *Современные направления повышения прочности и ресурса сварных конструкций* / Б. Е. Патон // *Автоматическая сварка*. – 2000. – № 9/10. – С. 3 – 9.
2. Назарчук А. Т. *Получение равнопрочных сварных соединений закаливающих сталей без подогрева и термической обработки* / А. Т. Назарчук, В. В. Снисарь, Э. Л. Демченко // *Автоматическая сварка*. – 2003. – № 5. – С. 41 – 50.
3. Єфіменко М. Г. *Матеріалознавство і термічна обробка зварних з'єднань* / М. Г. Єфіменко, Н. О. Радзівілова. – Харків, 2003. – 488 с.
4. Царюк А. К. *Проблемы предотвращения холодных трещин (обзор)* / А. К. Царюк, В. И. Бреднев // *Автоматическая сварка*. – 1996. – № 1. – С. 36 – 40.
5. Грабин В. Ф. *Металловедение сварки плавлением* / В. Ф. Грабин. – К. : Наукова думка, 1992. – 416 с.
6. Аснис А. Е. *Повышение прочности сварных конструкций* / А. Е. Аснис, Г. А. Иващенко. – К. : Наукова думка, 1978. – 190 с.
7. *Neues in der Schweisstechnik 1998* / E. Herold, M. Zinke, H. Zwickert et al. // *Schweissen und Schneiden*. – 1999. – № 5. – P. 266 – 288.
8. Brozda G. *Weldability evaluation of a modern TMCR steel by using simulation techniques* / G. Brozda, M. Zeman // *Acta Metal-lurgicaSinica*. – 2000. – № 1. – P. 103 – 111.

© Дерябкина Е.С.

Надійшла до редакції 05.04.2016