

СВАРИВАЕМОСТЬ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ И РАЗНОРОДНЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ СВАРКИ**Семенов В. М., Кабацкий А. В., Марков О. Е., Мартыновская Е. В., Малыгина С. В.**

Целью работы являлось изучение механизма образования трещин-надрывов в сварных соединениях, выполненных электрошлаковым способом из малоуглеродистых и низколегированных сталей. Для оценки сопротивляемости сталей образованию трещин-надрывов выбран количественный критерий – максимальная величина перемещения верхней кромки свариваемого образца (Δ), при которой в сварном соединении еще не появляются трещины. Изучена стойкость сварных соединений из сталей 08ГДНФ, 20ХНМФ, 16ГНМ, 25Х3НМ и Ст. 3 к образованию дефектов данного типа. Наибольшей склонностью, из этих сталей, к образованию трещин-надрывов обладает сталь 25Х3НМ, имеющая критерий $\Delta = 3,2$ мм, наименьшей склонностью – Ст. 3 ($\Delta = 7,68$ мм). Установлено также, что при электрошлаковой сварке разнородных сталей заготовка из стали, менее склонной к образованию трещин-надрывов, не влияет на критерий Δ для стали с большей чувствительностью к их образованию.

Метою роботи було вивчення механізму утворення тріщин-надривів в зварних з'єднаннях, виконаних електрошлаковим способом з маловуглецевих і низьколегованих сталей. Для оцінки опірності сталей утворенню тріщин-надривів обрано кількісний критерій – максимальну величину переміщення верхньої кромки зварюваного зразка (Δ), при якому в зварному з'єднанні ще не з'являються тріщини. Вивчено стійкість зварних з'єднань із сталей 08ГДНФ, 20ХНМФ, 16ГНМ, 25Х3НМ і Ст. 3 до утворення дефектів даного типу. Найбільшу схильність з цих сталей до утворення тріщин-надривів має сталь 25Х3НМ, для якої критерій $\Delta = 3,2$ мм, найменшу схильність – Ст. 3 ($\Delta = 7,68$ мм). Встановлено також, що при електрошлаковому зварюванні різнорідних сталей заготовка зі сталі, менш схильної до утворення тріщин-надривів, не впливає на критерій Δ для сталі з більшою чутливістю до їх утворення.

The study of the formation of tear cracks in low-carbon and low-alloy steel joints made by electroslag welding was done. To evaluate the resistance against tear cracking, quantitative criterion was selected – the maximum displacement of the upper edge of the welded sample (Δ), in which a welded joint is not yet cracked, was determined for the selected steels. The resistance against tear cracking of joints of 08ГДНФ, 20ХНМФ, 16ГНМ, 25Х3НМ and St. 3 was studied. The greatest crack susceptibility has 25Х3НМ steel, having criterion $\Delta = 3,2$ mm, the smallest susceptibility was observed for St. 3 ($\Delta = 7,68$ mm). It is established, that during electroslag welding of dissimilar steels, workpiece made of steel, less susceptible to tear cracking, does not affect the Δ -criterion of steel which is more sensitive to their formation.

Семенов В. М.

д-р техн. наук, проф. ДГМА

Кабацкий А. В.

канд. техн. наук, доц. ДГМА

Марков О. Е.

д-р техн. наук, проф. ДГМА

Мартыновская Е. В.

аспирант ДГМА

Малыгина С. В.

канд. техн. наук, доц. ДГМА

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

УДК.621.791.793.

Семенов В. М., Кабацкий А. В., Марков О. Е., Мартыновская Е. В., Малыгина С. В.

СВАРИВАЕМОСТЬ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ И РАЗНОРОДНЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ СВАРКИ

При производстве тяжелого кузнечно-прессового, прокатного, металлургического и других видов оборудования в настоящее время широкое применение нашли низколегированные стали повышенной прочности, обеспечивающие в сечении до 500 мм после нормализации с отпуском получение предела текучести более 500 МПа (20ХН3М, 25ХН3МФ, 08ГДНФ и др.). Применение сварки при производстве крупных заготовок из данных сталей позволило использовать в одном изделии две или несколько разных марок сталей. При этом использование ряда сталей тесно связано с вопросом изучения их свариваемости и, главным образом, сопротивляемости сварных соединений образованию холодных и горячих трещин.

Сварке низколегированных и разнородных сталей применительно к производству крупных сварных заготовок тяжелого машиностроения посвящен ряд работ отечественных и зарубежных авторов [1 – 3]. В последнее время при изготовлении сварных конструкций, особенно из низколегированных сталей повышенной прочности, участились случаи образования в металле околошовной зоны трещин-надрывов. Исправление сварных изделий, пораженных трещинами-надрывами, представляет собой сложный и трудоемкий процесс и ведет к большим потерям металла, удлинению цикла изготовления изделия. Все это снижает эффективность производства и требует особого внимания к изучению вопроса образования и предупреждения трещин-надрывов.

Целью настоящей работы было изучение свариваемости низколегированных и разнородных сталей применительно к сварным изделиям тяжелого машиностроения. Для достижения этой цели ставились задачи изучения механизма образования трещин-надрывов при электрошлаковой сварке низколегированных сталей, а также определения сравнительной стойкости против образования трещин-надрывов сварных соединений из применяющихся на производстве сталей.

Причину образования трещин-надрывов исследователи связывают с появлением по границам зерен легкоплавких эвтектик, образующихся в результате химической неоднородности при оплавлении зерен [4]. В этой связи в настоящей работе для изучения свариваемости, в частности, для оценки стойкости низколегированных и разнородных сталей против образования трещин-надрывов, была принята методика, описанная в работе [5]. Она позволяет изменять величину растягивающих усилий в свариваемом образце за счет создания изгибающего момента в нем на участке металлической ванны.

В качестве образцов используют две заготовки размерами 80 × 80 × 200 мм. Одну из них изготавливают из стали Ст 3 и закрепляют неподвижно к штанге 3 тягой 4 и зажимом 5. Вторую заготовку 6 из исследуемой стали устанавливают с зазором 28–32 мм по отношению к неподвижной, соединяют подвижной тягой 7 с гайкой-вилкой 8 и зажимом 9 и закрепляют фиксатором 10. Перемещение верхней кромки заготовки осуществляют движением гайки посредством винта 11, закрепленным в штанге 12 через упорный подшипник 13. Вращение винту передается от электродвигателя через редуктор 15 и полумуфту 16. Испытания проводят на установке, принцип работы которой показан на рис. 1. В процессе сварки к образцу сверху прикладывают растягивающую силу P , а внизу сжимающее усилие Q , которые создают изгибающий момент в зоне сварки.

Принятая схема позволяет имитировать реальные условия поворота свариваемых кромок при электрошлаковой сварке крупных изделий, при которых в металле околошовной зоны возникают растягивающие напряжения, вызывающие появление трещин-надрывов. После окончания второго нагружения образца сварку продолжают еще 2-3 минуты для вывода усадочной раковины.

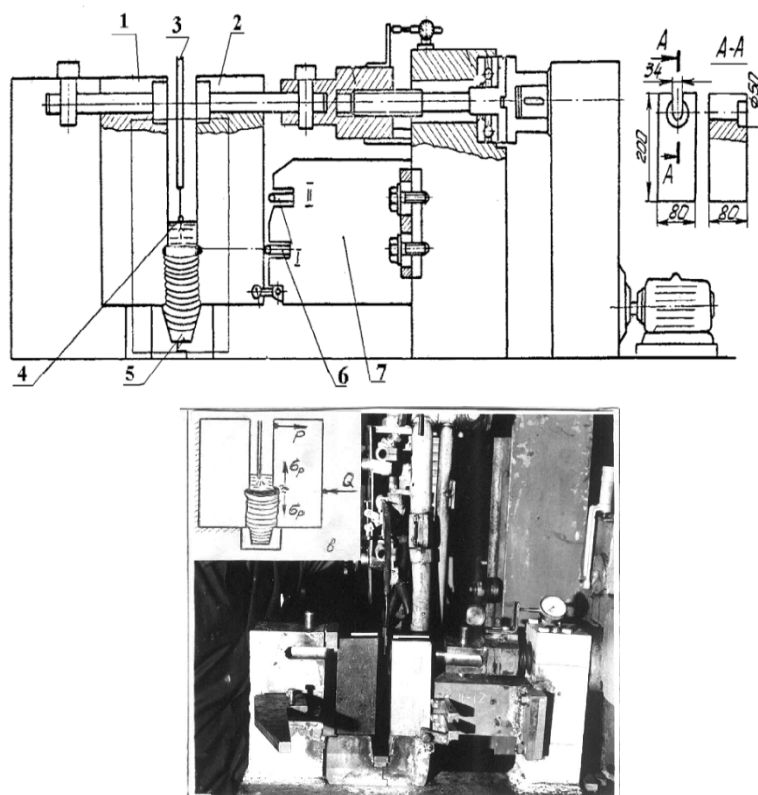


Рис. 1. Схема и общий вид установки для экспрессной оценки сопротивляемости сталей против образования трещин – надрывов

Из сваренного образца изготавливают продольный макрошлиф и определяют наличие трещин-надрывов. Если в макрошлифе обнаружены трещины, следующий образец сваривают при меньшей величине растяжения. При отсутствии трещин величину растяжения увеличивают. За количественный критерий оценки сопротивляемости стали образованию трещин-надрывов принята максимальная величина перемещения верхних кромок образца, при которой в металле околошовной зоны еще не появляются трещины-надрывы.

При изучении свариваемости разнородных сталей были изготовлены образцы из сталей 20ХНМФ, 16ГНМ, 08ГДНФ, 20ХЗНМ и Ст. 3. Для сравнения с этими низколегированными сталями была принята сталь 36Х2Н2МФ. Химический состав и механические свойства исследуемых сталей представлены в табл. 1 и 2.

В качестве сварочных материалов выбраны: сварочные проволоки Св-10Г2, Св-08ХН2М диаметром 3 мм и флюс АН-348А. Их химический состав приведен в табл. 3 и 4.

При выполнении экспериментов использовали аппарат А-535, в качестве источника питания использовался трансформатор ТШС-1000-3.

Таблица

Химический состав изучаемых сталей

Марка стали	Содержание элемента, %								
	С	Мn	Si	S	P	Ni	Cr	Mo	V
20ХНМФ	0,18	0,24	0,33	0,022	0,09	1,40	1,46	0,40	0,1
16ГНМ	0,16	1,22	0,21	0,016	0,013	1,26	0,08	0,50	–
08ГДНФ	0,10	0,80	0,30	0,040	0,040	0,30	0,40	–	–
Ст. 3	0,11	1,47	0,34	0,007	0,02	0,022	0,025	–	–
36Х2Н2МФ	0,40	1,50	0,28	0,022	0,010	2,28	1,63	0,28	0,09
25ХЗНМ	0,27	0,44	0,32	0,025	0,010	2,97	1,37	0,38	–

Таблица 2

Механические свойства сталей

Марка стали	σ_r , МПа	σ_B , МПа	δ , %	Ψ , %	KSU , кДж/м ²
20ХНМФ	625	795	20,5	64,7	1,66
16ГНМ	315	500	19,0	49,0	0,78
08ГДНФ	427	540	29,5	73,0	1,90
Ст. 3	220	400	24,0	53,0	0,80
36Х2Н2МФ	750	860	14,0	32,0	0,50

Таблица 3

Химический состав сварочных проволок

Марка проволоки	Содержание элемента, %								
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo	V
Св-10Г2	0,10	1,60	0,03	0,002	0,020	0,15	0,25	–	–
Св-08ХН2М	0,10	0,65	0,17	0,025	0,025	0,88	1,5	0,32	–
Св-20ХН3МФ	0,20	0,54	0,34	0,015	0,018	1,6	3,68	0,43	0,19

Таблица 4

Химический состав флюса АН-348А(%):

SiO ₂	MnO	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	S	P	CaF ₂
40,0-44,0	31,0-38,0	<12,0	<7,0	<13,0	0,5-2,2	<0,11	<0,12	3,0-6,0

Образцы закрепляли в установке для испытания, установив зазор между свариваемыми кромками в верхней части стыка 22 мм, и в нижней 30 мм. Такой, так называемый «обратный развал кромок», с меньшей величиной зазора в верхней части стыка объясняется стремлением получить шов с равномерным проваром с учетом растяжения верхней части образца в процессе сварки.

Первоначально, сваривали заготовки одной и той же марки стали. После изучения склонности каждой из выбранных марок сталей 20ХНМФ, 08ГДНФ, 25Х3НМ, Ст.3 и 36Х2Н2МФА к образованию трещин-надрывов, последующие образцы изготавливали из заготовок разнородных сталей. При этом одну из заготовок брали из изучаемой марки стали, в качестве другой – заготовку из Ст. 3. Такой выбор был сделан потому, что в сварных конструкциях при использовании разнородных сталей для изготовления менее ответственных частей изделия по возможности используют хорошо свариваемые стали: сталь 20ГС, Ст. 3 и др. Образцы сваривали на постоянном режиме: напряжение 43-46 В, скорость подачи электродной проволоки 150 м/ч; количество проволок – 1; глубина шлаковой ванны 50 мм; величина сухого вылета электрода 80 мм; расход воды в формирующих устройствах 15 л/мин; скорость нагружения образца, определяемая скоростью перемещения свариваемых кромок, выбрана постоянной и составляла 19,2 мм/мин. Из образцов изучаемых сталей вырезали темплеты и изготавливали макрошлифы (рис. 2).

Результаты осмотра макрошлифов показали, что в образцах из стали 36Х2Н2МФ трещины-надрывы образуются при величине перемещения кромок (Δ) 3,84 мм, в то время как на Ст. 3 они появляются при величине перемещения 8 мм. Исследование микроструктуры металла с трещинами-надрывами показало, что часть их располагается в околосшовной зоне (рис. 2, б), а часть пересекает границу сплавления, переходя в шов. Как правило, и те и другие ориентированы поперек линии сплавления, что указывает на то, что причиной их

образования являются возникающие в сварном соединении продольные растягивающие напряжения. Из рис. 2, б видно, что величина раскрытия той части трещины, которая расположена в околошовной зоне, значительно больше величины ее участка, уходящего в металл шва. Аналогичный вид трещин, пересекающих границу сплавления, наблюдали не только в сварных соединениях Ст. 3, но и при изучении микрошлифов стали 36Х2Н2МФ, и для других сталей. Это позволяет утверждать, что трещины-надрывы образуются в околошовной зоне и, под действием растягивающих напряжений, возникающих в результате термомодеформационных процессов, распространяются в металл шва. Сопоставление трещин, полученных в образцах, испытанных по настоящей методике, с трещинами, образующимися в крупных заготовках в процессе их сварки, показывает их идентичность: И те и другие располагаются в металле околошовной зоны, имеют одинаковую величину и направленность, пересекая линию сплавления. Это указывает на то, что применяемая методика воспроизводит условия образования трещин-надрывов при электрошлаковой сварке крупных изделий. Результаты исследования сопротивляемости исследуемых сталей образованию трещин-надрывов представлены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты исследования свариваемости изучаемых сталей

Марка стали	Величина перемещения, мм	Наличие трещин-надрывов
36Х2Н2МФ	До 3,20	Нет
	3,84 и выше	Есть
16ГНМ	До 4,48	Нет
	5,12 и выше	Есть
08ГДНФ	До 6,40	Нет
	7,00 и выше	Есть
25Х3НМ	До 3,20	Нет
	3,84 и выше	Есть
Ст. 3	До 7,68	Нет
	8,32 и выше	Есть

Изучение образования трещин-надрывов при электрошлаковой сварке разнородных сталей показало, что величина критерия не изменяется для изучаемых низколегированных сталей при электрошлаковой сварке их со Ст. 3. Так, при сварке между собой заготовок из стали 20ХНМФ значение $\Delta = 384$ мм. То же значение его получается при сварке стали 20ХНМФ со Ст. 3.

Учитывая, что образование трещин-надрывов связывают с появлением по границам зерен легкоплавких эвтектик, образующихся в результате химической неоднородности, нами были проведены эксперименты по сварке образцов различными марками сварочной проволоки с целью определения влияния химического состава шва на чувствительность металла околошовной зоны к образованию трещин-надрывов. Использовали сварочные проволоки СВ-08ХН2М, Св-20ХН3МФ. Режимы сварки применяли аналогичные указанным выше.

Проведенными опытами не удалось установить различия в сопротивляемости металла околошовной зоны образованию трещин-надрывов при сварке образцов различными сварочными проволоками. Такой вывод, однако, не следует считать окончательным, поскольку изучение данного вопроса проводили на малом количестве экспериментов (для каждой проволоки было сварено по одному образцу) и без привлечения глубоких исследований с изучением диффузионных процессов, происходящих на границе жидкий металл шва-околошовная зона, что не ставилось целью в настоящей работе.

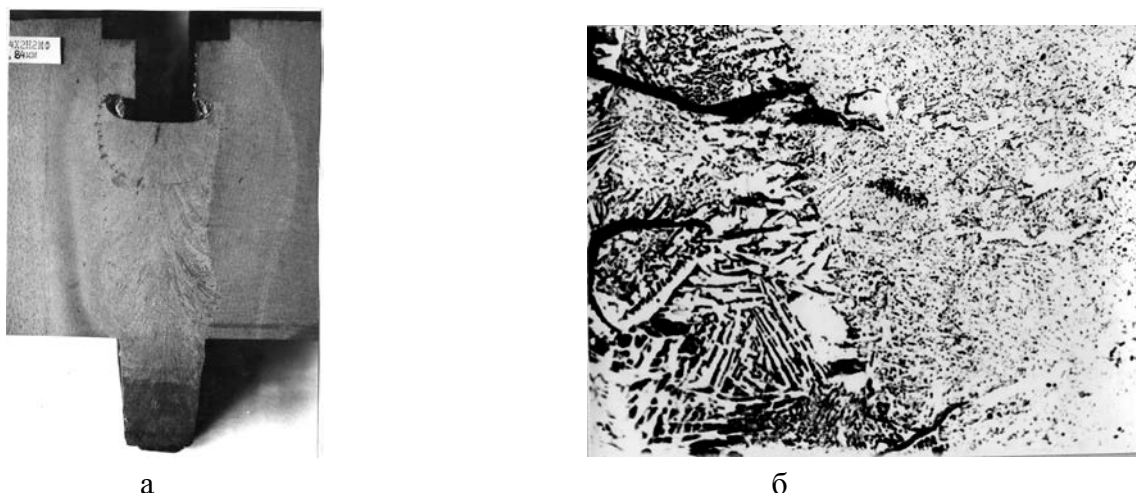


Рис. 2. Макрошлиф сварного образца (а) и микроструктура с трещинами-надрывами (б)

ВЫВОДЫ

1. Проведено изучение образования трещин-надрывов в сварных соединениях, выполненных электрошлаковым способом из малоуглеродистых и низколегированных сталей. Установлено, что их образование является следствием термомеханических процессов, происходящих в металле околошовной зоны.

2. Для оценки сопротивляемости сталей образованию трещин-надрывов выбран количественный критерий – максимальная величина перемещения верхней кромки свариваемого образца (Δ), при которой в сварном соединении еще не появляются трещины.

3. Изучена стойкость сварных соединений из сталей 08ГДНФ, 20ХНМФ, 16ГНМ, 25Х3НМ и Ст. 3 к образованию дефектов данного типа. Наибольшей склонностью, из этих сталей, к образованию трещин-надрывов обладает сталь 25Х3НМ, имеющая критерий $\Delta = 3,2$ мм, наименьшей склонностью – Ст. 3 ($\Delta = 7,68$ мм).

4. Изучена сопротивляемость образованию трещин-надрывов сварных соединений, выполненных из разнородных сталей. Установлено, что при электрошлаковой сварке разнородных сталей заготовка из стали, менее склонной к образованию трещин-надрывов, не влияет на критерий Δ для стали с большей чувствительностью к их образованию.

5. Металлографическими исследованиями установлено, что трещины-надрывы в образцах идентичны тем, которые имеют место при электрошлаковой сварке крупных изделий, что указывает на возможность применения данной методики для изучения трещин-надрывов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семенов В. М. Изготовление крупных конструкций с применением электрошлаковой сварки / В. М. Семенов. – Краматорск : ДГМА, 2012. – 228 с.
2. Ресурсосберегающие технологии при производстве сварных заготовок / В. М. Семенов, А. В. Жартовский, В. И. Кабацкий [и др.] – Краматорск : ДГМА, 2009. – 160 с.
3. Влияние легирующих элементов на склонность металла шва к образованию горячих трещин при электрошлаковой сварке / В. М. Семенов, В. Д. Кассов, А. В. Иванык [и др.] // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2013. – № 1 (30). – С. 149–152.
4. Макаров Э.Л. Холодные трещины при сварке легированных сталей / Э. Л. Макаров. – М.: Машиностроение, 1981. – 247 с.
5. Семенов В. М. Экспрессные методы оценки и прогнозирования качества сварных соединений при электрошлаковой сварке / В. М. Семенов // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2010. – № 1 (18). – С. 279–284.