

УДК 621.791

**Кабацкий В. И., Кабацкий А. В.**

## **НИЗКОЛЕГИРОВАННЫЕ ЭЛЕКТРОДЫ ДЛЯ СВАРКИ ЗАКАЛИВАЮЩИХСЯ СТАЛЕЙ**

Как известно, одной из главных проблем, возникающих при сварке высокопрочных сталей, является опасность образования холодных трещин в зоне термического влияния сварных соединений («отколов»). Применение для сварки этих сталей подавляющего большинства известных низколегированных электродных материалов проблематично без использования подогрева, и последующей термической обработки сварных соединений. Поэтому повышение стойкости против образования холодных трещин сварных соединений закаливаемых сталей с низколегированными швами является весьма актуальным, особенно в современных условиях недостатка энергоресурсов.

Одним из перспективных путей борьбы с образованием холодных трещин может служить модифицирование металла шва и зоны сплавления сварных соединений [1, 2]. Так, установлено [3], что существенный эффект на стойкость против отколов оказывает модифицирование наплавленного металла азотом и ванадием в сочетании с поверхностно-активными элементами.

В результате проведенных на основании работы [3] исследований осуществлялась разработка электродов с покрытием основного вида, предназначенных для сварки конструкций из закаливаемых сталей.

Целью настоящей работы являлось исследование стойкости против отколов и факторов ее повышения для разработанных низколегированных электродных материалов.

Легирующие и модифицирующие добавки вводились в опытные электроды через электродное покрытие. Электродные стержни выполнялись из низкоуглеродистой сварочной проволоки Св-08А. Азот вводили в металл в составе азотосодержащих ферросплавов (феррохрома 015Н1КЛ6, марганца азотированного марки МрН4Б). В качестве поверхностно-активных использовались редкоземельные элементы, которые вводились в электродное покрытие в составе лигатуры ФС30Р3М30.

Исследовались сварные соединения, выполненные ручной дуговой сваркой опытными электродами с покрытием основного вида на сталях 35ХМ и 25ХН3МФА.

Оценку сопротивляемости сварных соединений образованию холодных трещин производили с помощью технологической пробы Теккен. При этом для более полной оценки вариантов фиксировалось время от момента окончания сварки до выхода трещины на поверхность металла. Пробы собирались из пластин размерами 200 × 150 × 15 мм с постоянным зазором 2 мм на участке контрольного шва. Контрольный шов выполнялся испытываемыми электродами диаметром 4 мм в один проход на режиме  $I_{св.} = 160-180$  А,  $U_{д.} = 22-24$  В. При отсутствии визуально наблюдаемой трещины после выдержки пробы в течение 48 часов из контрольного шва вырезали темплеты и изготавливали макрошлифы. Окончательное заключение делалось в таком случае после исследования микрошлифов. Каждым вариантом опытных электродов сваривалось 2–3 пробы.

Определение механических свойств наплавленного металла осуществлялось при сварке образцов толщиной 15 мм с V-образной разделкой кромок. Пластины сваривали ручной дуговой сваркой электродами диаметров 4 мм на указанном выше режиме.

Для получения стабильно бездефектных соединений были проведены дополнительные исследования склонности к образованию отколов соединений стали 35ХМ. При этом

осуществлялось варьирование содержания в наплавленном металле марганца и никеля. В табл. 1 приводится ряд химических составов наплавленного металла, полученного при испытании опытных электродов.

Как показывают испытания, снижение концентраций никеля и марганца приводит к получению соединений, обладающих стабильной сопротивляемостью образованию отколов (вариант 3). Кроме того, установлено, что достаточно высокой трещиностойкости позволяет достичь сочетание в наплавленном металле 0,4–0,5 % марганца и 2,8–3,0 % никеля (вариант 5).

Таблица 1

Варианты расчетных составов наплавленного металла

№ п/п	Содержание элемента, %									Наличие трещин в пробе Теккен		Время до появления визуально наблюдаемой трещины, характер трещины
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	N	Ce	Визуально	По макрошлифам	
1	0,1	1,4–1,6	0,4–0,6	0,2–0,4	1,4–1,6	0,4–0,6	0,05–0,15	0,015–0,025	0,05 % (по расчету)	Нет Нет	Есть Нет	Надрыв на шлифе –
2	0,1	0,9–1,1	0,4–0,6	0,2–0,4	0,9–1,1	0,4–0,6	0,05–0,15	0,015–0,025		Нет Есть	Нет –	– > 24 ч.
3	0,1	0,2–0,6	0,4–0,6	0,4–0,6	–	0,1–0,3	0,05–0,15	0,015–0,025		Нет Нет	Нет Нет	– –
4	0,1	0,9–1,1	0,2–0,4	0,4–0,5	2,8–3,0	0,1–0,2	0,05–0,15	0,015–0,025		Есть Нет	– Есть	> 7 ч Надрыв на шлифе
5	0,1	0,2–0,6	0,2–0,3	0,5–0,6	2,8–3,0	0,1–0,2	0,05–0,15	0,015–0,025		Нет Нет	Нет Нет	– –

Электроды обеспечивают наплавленный металл, отвечающий по ГОСТ 9467-80 типу Э55-Э65 типа 10ХМАФ и 10ХНЗМАФ. При сварке стали 35ХМ металл швов имеет химический состав и механические свойства, приведенные в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Химический состав металла сварных швов, выполненных разработанными электродами

Металл шва	Содержание элементов в металле шва, %								
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	N	Ce
10ХМАФЧ (ЭФК – 40)	0,07–0,12	0,2–0,6	0,10–0,45	0,15–0,35	–	0,15–0,30	0,02–0,10	0,025–0,03	0,05–0,10
10ХНЗМАФЧ (ЭФК – 46)	0,07–0,12	0,2–0,6	0,10–0,45	0,15–0,35	2,8–3,2	0,15–0,30	0,02–0,10	0,025–0,03	0,05–0,10

Примечание: азот и церий вводятся по расчету и анализом в металле не определяются.

Таблица 3

## Механические свойства металла сварных швов

Металл шва	$\sigma_{0,5}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\psi$ , %	КСУ, Дж/см <sup>2</sup> , при		
					+ 20 °С	- 40 °С	- 60 °С
10ХМАФЧ (ЭФК-40)	470	620	20	55	102	65	–
10ХНЗМАФЧ (ЭФК-46)	580	670	15,5	66,5	104	53	50

Испытания разработанных электродов в сравнении с широко используемыми для сварки закаливающихся сталей электродами показали существенное различие в стойкости против образования холодных трещин (табл. 4). При сварке образцов разработанными электродами возникновения холодных трещин в пробах удается избежать без использования подогрева. В то же время при испытаниях с использованием электродов УОНИ, ЦЛ и АНП в сварных соединениях образуются трещины-отколы.

Таблица 4

## Стойкость против трещин при сварке различных сталей

Марка электрода	Марка стали	Температура подогрева, °С	Наличие трещин в пробе Теккен		Время до появления визуально наблюдаемой трещины, характер трещины
			визуально	по макрошлифу	
УОНИИ 13/55	25ХНЗМФА	–	Есть	–	10 мин.
		250	Есть	–	1 – 1,5 ч.
		350	Нет	Нет	–
ЦЛ – 45	25ХНЗМФА	–	Есть	–	20 мин – по шву
		35ХМ	–	–	25 мин – по ЗТВ
АНП – 2	25ХНЗМФА	–	Есть	–	5 мин.
		35ХМ	–	–	10 мин – по шву
ЭФК – 40, ЭФК – 46	25ХНЗМФА	–	Нет	Нет	–

Металлографические исследования сварных соединений из стали 35ХМ показали, что швы оптимального состава имеют преимущественно мелкозернистую дезориентированную первичную структуру. Вторичная структура представляет собой дисперсную смесь игольчатых микроструктурных составляющих (очевидно, игольчатого феррита и нижнего бейнита). Это может свидетельствовать о наличии равномерно распределенной нитридной фазы, являющейся центрами активного внутризеренного зарождения структурных составляющих [4, 5].

В зоне термического влияния соединений наблюдается бейнито-мартенситная структура, состоящая, по-видимому, из нижнего бейнита и отпущенного мартенсита. Подтверждением этому могут служить значения микротвердости в ЗТВ, которые составляют в среднем  $380 \div 410$  МПа.

Результаты проведенных испытаний свидетельствуют о том, что выбранный способ модифицирования позволяет получить достаточно высокие прочностные характеристики

металла шва в сочетании с повышением стойкости против образования трещин в сварном соединении. Изучение структуры наплавленного металла подтверждает, что оптимальное соотношение прочности и стойкости против трещин может быть достигнуто не за счет традиционно используемого упрочнения феррита при легировании его элементами-упрочнителями, а путем образования мелкодисперсной нитридной фазы. Это, по-видимому, приводит к диспергированию первичной структуры, а также к увеличению числа центров зарождения игольчатого феррита [6–8].

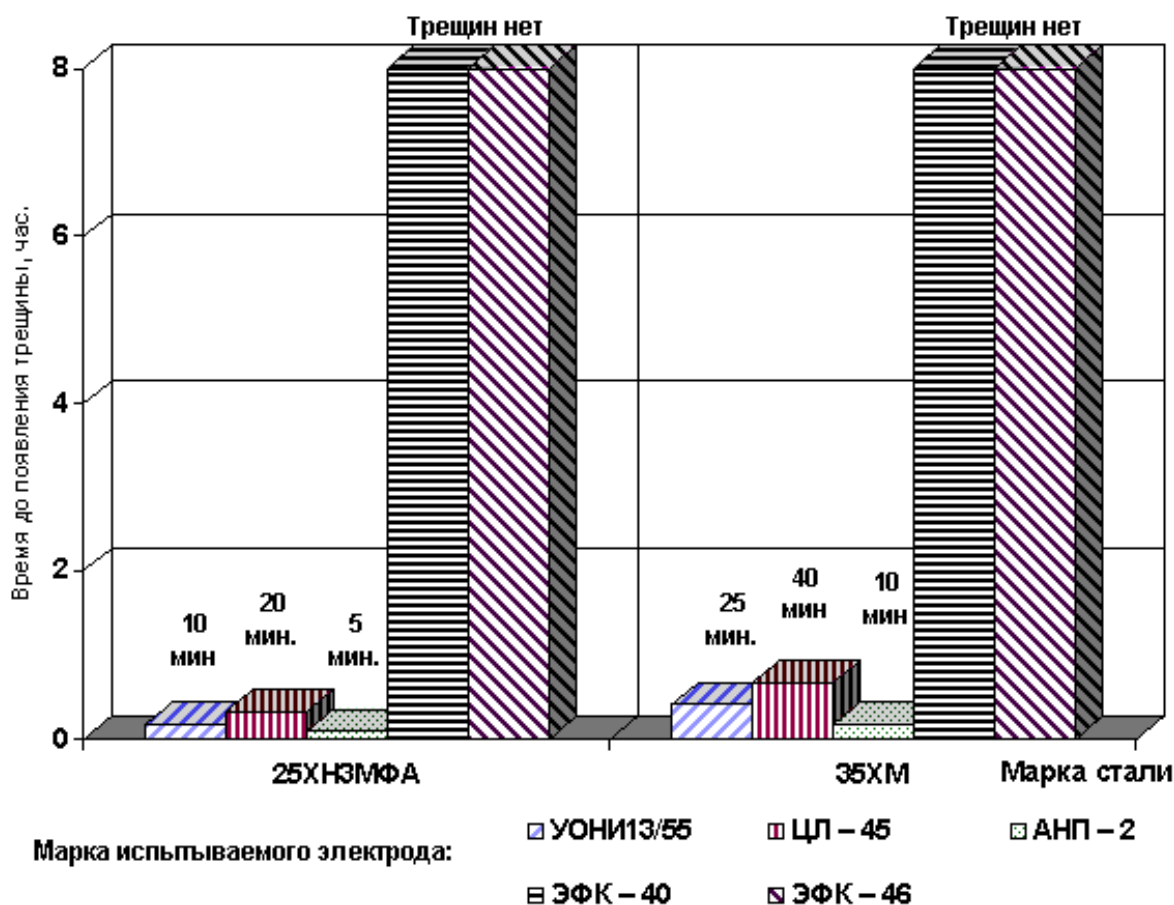


Рис. 1. Диаграмма испытаний разработанных и стандартных электродов

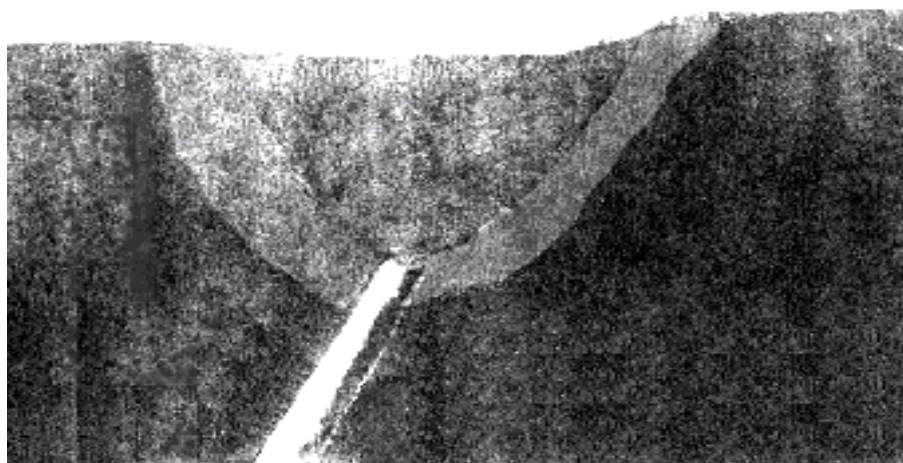


Рис. 2. Макрошлиф пробы Теккен, заваренной разработанными электродами

Введение азота и ванадия в сочетании с активными элементами способствует также изменению морфологии сульфидных включений в зоне сплавления сварного соединения, что, по всей видимости, может благоприятно сказываться на сопротивляемости образованию холодных трещин соединений с низколегированными швами [9].

В настоящее время электроды марки ЭФК-40 прошли промышленную проверку при ремонте крупного литья из стали 35ХМЛ в условиях ЗАО «НКМЗ». По технологии, принятой на предприятии, заварка дефектов серийных изделий производится электродами УОНИ 13/55 с предварительным подогревом и последующей термообработкой изделия. Проверка разработанных электродов осуществлялась без использования предварительного подогрева. Тщательный осмотр изделий в течение всего технологического цикла, в том числе после окончательной термической (закалки с отпуском) и механической обработки показал отсутствие трещин в металле соединений. Полученные результаты позволяют рекомендовать использование разработанных сварочных материалов при изготовлении и ремонте жестких сварных конструкций из закаливающихся сталей.

### ВЫВОДЫ

1. В результате проведенных исследований были разработаны электроды с покрытием основного вида, предназначенные для сварки конструкций из закаливающихся сталей.
2. Испытания разработанных электродов показали, что они обеспечивают существенное повышение стойкости против образования холодных трещин без использования подогрева, в сравнении с широко используемыми для сварки закаливающимися сталями.
3. Полученный эффект достигается за счет благоприятного изменения структуры металла и морфологии неметаллических включений в зоне сплавления сварных соединений.
4. Результаты промышленной проверки позволяют рекомендовать использование разработанных сварочных материалов при изготовлении и ремонте жестких сварных конструкций из закаливающихся сталей.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Структура и свойства зоны термического влияния сварных соединений высокопрочной стали мартенситного класса / В. И. Кабацкий, В. В. Подгаецкий, Д. П. Новикова и др. // Автоматическая сварка. – 1986. – № 1. – С. 16–20.
2. Влияние модифицирования неметаллических включений редкоземельными металлами на структуру и свойства металла шва при сварке высокопрочных сталей / В. Ф. Мусияченко, И. С. Мельник, М. Б. Мовчан и др. // Автоматическая сварка. – 1987. – № 6. – С. 1–6.
3. Кабацкий В. И. Влияние модифицирования металла шва на сопротивляемость замедленному разрушению сварных соединений высокопрочных сталей / В. И. Кабацкий, А. В. Кабацкий // Автоматическая сварка. – 2004. – № 3. – С. 22–26.
4. Бабаски Ю. З. Структура и свойства литой стали / Ю. З. Бабаски. – Киев : Наукова думка, 1980. – 240 с.
5. Ricks R. A. The nature of acicular ferrite in HSLA steel weld metals / R. A. Ricks, P. R. Howell, G. S. Barritte // Journal of Material Science. – 1982. – V. 17. – № 5. – P. 132–140.
6. Dolby R. E. The influence of vanadium on the microstructure and toughness of ferritic weld metal – a review / R. E. Dolby // Metal construction. – 1982. – № 3. – P. 148–153.
7. Плещак В. М. Анализ способов повышения хладостойкости сварных конструкций / В. М. Плещак // Сварочное производство. – 1987. – № 1. – С. 14–16.
8. Подгаецкий В. В. К вопросу о зарождении игольчатого феррита в сварных швах / В. В. Подгаецкий, Г. И. Парфессо // Автоматическая сварка. – 1991. – № 10. – С. 10–12.
9. Кабацкий В. И. Свойства зоны термического влияния сварных соединений высокопрочной стали мартенситного класса со швами различного легирования / В. И. Кабацкий, Г. И. Парфессо, Д. П. Новикова // Технологические основы современного сварочного производства : сб. статей. – Краматорск : КИИ, 1992. – С. 61–67.