

УДК.621.791.793

Семенов В. М., Чигарев В. В.

**ВЛИЯНИЕ ВАКУУМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛА ЗАГОТОВОК ПОД ЭЛЕКТРОШЛАКОВУЮ СВАРКУ НА СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ**

Одной из ключевых проблем повышения эффективности использования электрошлаковой сварки (ЭШС) при производстве крупных сварных конструкций из углеродистых и легированных сталей является уменьшение степени перегрева металла околошовной зоны (ОШЗ), способствующей снижению сопротивляемости металла против хрупкого разрушения.

Отрицательное влияние перегрева устраняют применением после сварки высокотемпературной (880–900 °С) и длительной (более 7 суток) термической обработки, что требует значительных затрат энергетических, материальных ресурсов и снижает эффективность применения ЭШС [1–3]. Это подтверждает актуальность работ, направленных на решение указанной проблемы.

Целью исследований является повышение эффективности производства сварных конструкций за счет отмены нормализации после ЭШС, путем вакуумирования металла свариваемых заготовок.

Для исследований была взята сталь 25ГС, широко применяемая при ЭШС изделий оборудования тяжелого машиностроения. Эта сталь, как и многие другие стали, применяемые при ЭШС, чувствительна к перегреву металла околошовной зоны (ОШЗ) и образованию крупнозернистой структуры с пониженными значениями ударной вязкости. Изучение влияния вакуумирования проводили на металле опытной и производственных плавках (табл. 1).

Таблица 1

Сведения по плавкам стали 25ГС

Тип печи (способ разливки стали)	Химический состав стали в %					
	C	Mn	Si	Cr	Ni	S
1. Мартеновская (на воздухе)	0,23	1,25	0,64	0,30	0,20	0,022
Мартеновская (в вакууме)	0,24	1,29	0,68	0,31	0,20	0,021
2. Электрическая (на воздухе)	0,24	1,18	0,80	0,24	0,24	0,018
3. Мартеновская + электродуговая (в вакууме)	0,24	1,26	0,62	0,11	следы	0,027
4. Мартеновская (в вакууме)	0,30	1,26	0,68	0,13	0,08	0,023
5. Мартеновская (в вакууме)	0,20	1,02	0,64	0,23	следы	0,019
6. Мартеновская + электродуговая (в вакууме)	0,23	1,25	0,65	0,13	0,23	0,027
7. Мартеновская (в вакууме)	0,24	1,10	0,77	0,31	0,25	0,017
8. Мартеновская + электродуговая (в вакууме)	0,22	1,34	0,72	0,19	0,22	0,011

Содержание алюминия в опытной плавке (№ 1), отлитой на воздухе и в вакууме, составляло 0,012 и 0,04 % соответственно.

Опытную плавку стали (№ 1) проводили в основной мартеновской печи емкостью 80 т скрап-процессом с добавлением в шихту малосернистого чугуна. Топливом для печи служил мазут. В печи металл раскисляли 75 %-ым ферромарганцем и силикомарганцем, а в ковше – только 45 %-ым ферросилицием. Плавку разлили на два слитка весом по 36 т. При этом один из слитков отливали в вакууме, другой – на воздухе. Вакуумную разливку опытной плавки производили по ниже приведенной технологии. Жидкую сталь заливали в изложницу, помещенную в камеру вакуумной установки, через промежуточный ковш, герметически соединенный с камерой. За 35 мин до начала разливки приступали к разряжению камеры, постепенным включением вакуумных насосов. При достижении в камере давления 4 мм рт. ст. начинали заливку стали. После выпуска плавки разливочный ковш с жидкой сталью подавали к камере и центрировали над промежуточным ковшом. После заполнения промежуточного ковша до половины открывали стопор и сталь выпускали в изложницу, находящуюся в камере для ее дегазации. Разрежение в вакуумной камере в начале разливки – 6 мм рт. ст., в конце – 10 мм рт. ст.

Для легирования стали 25ГС кремнием и марганцем потребовалось введение повышенных, против обычно применяемых для раскисления металла количеств соответствующих ферросплавов. Показано также, что разливка металла в вакууме является весьма эффективным средством уменьшения окисления алюминия, введенного как сопутствующая примесь при раскислении и легировании во время разливки стали 25ГС (табл. 2). Дальнейшие исследования включали выбор оптимального состава сварочных материалов, обеспечивающих получение металла шва с механическими свойствами (после отпуска) не ниже требуемых по техническим условиям свойств для основного металла:  $\sigma_s \geq 500$  МПа,  $\sigma_m \geq 300$  МПа,  $\delta \geq 20$  %,  $\Psi \geq 30$  %,  $KCV \geq 50$  Дж/см<sup>2</sup>. Для этого из обоих слитков отковали обечайки с наружным диаметром 1830 мм и внутренним – 1460 мм, которые подвергли изотермическому отжигу. От обечаек отрезали кольца шириной 150 мм, которые затем сваривали ЭШС и исследовали. Изучали влияние температуры, продолжительности выдержки и скорости охлаждения при отпуске на свойства основного металла и околошовной зоны. Анализ металла опытной плавки показал, что сталь, разлитая в вакууме, как и следовало ожидать, содержала значительно меньше неметаллических включений и газов, чем разлитая на воздухе (табл. 2).

Таблица 2

## Содержание включений и газов

Способ разливки стали	Состав включений и газов, %						
	SiO <sub>2</sub>	MnO	FeO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	O <sub>2</sub>	Азот
В вакууме	32,5	18,2	нет	0,41	40,2	0,0013	0,0056
На воздухе	35,5	20,6	3,72	0,40	43,0	0,0039	0,008

Механические свойства сварного соединения исследовали без термической обработки, после отпуска при различных температурах и скоростях охлаждения и после нормализации (900 °С) с отпуском.

При определении ударной вязкости металла ОШЗ надрезы на ударных образцах располагали на расстоянии 1,5...2,0 мм от линии сплавления. Металл, разлитый в вакууме (сплошная линия), имел более высокую ударную вязкость в ОШЗ и вне ее, чем разлитый на воздухе (пунктирная линия) (рис. 1).

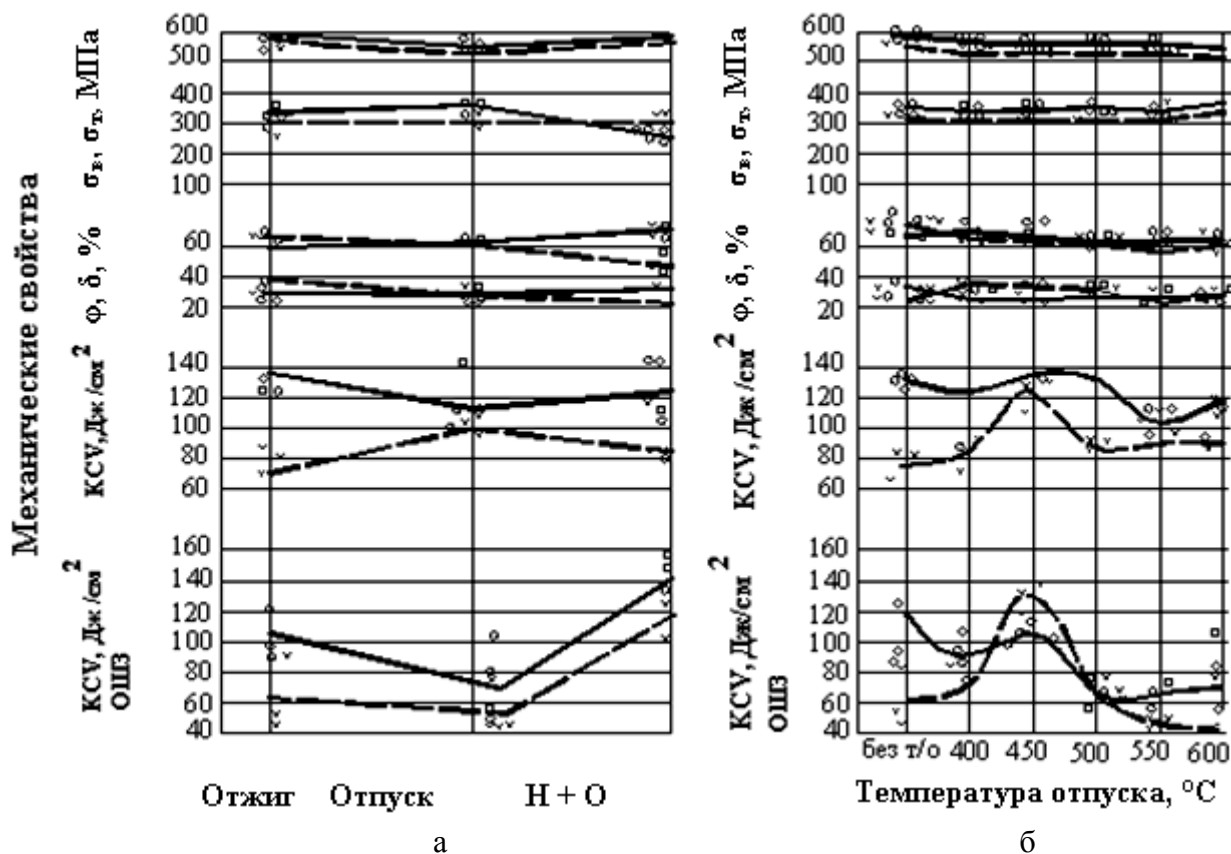


Рис. 1. Зависимость механических свойств основного металла и ударной вязкости околошовной зоны от:

а – вида термической обработки; б – температуры отпуска (выдержка – 2 ч, охлаждение с печью)

Это объяснялось удалением из стали неметаллических включений, газов и меньшим окислением алюминия. Отпуск сварного соединения при 600 °С в течение 2 ч не оказал существенного влияния на свойства основного металла и околошовной зоны. Нормализация же с отпуском привела к увеличению ударной вязкости металла околошовной зоны, не изменив существенно механических свойств основного металла. Механические свойства основного металла и околошовной зоны стали промышленных плавок определяли после отпуска сварного соединения.

Металл, отлитый в вакууме, отмечен сплошной линией, на воздухе – пунктирной. Дополнительная нормализация с отпуском не повлияла существенно на механические свойства основного металла стали 25ГС. Кроме того, металл околошовной зоны сварного соединения стали 25ГС с содержанием серы в фосфоре более 0,025, углерода – более 0,25, имел после отпуска значения ударной вязкости ниже допустимых для этой стали (ниже 50 Дж/см<sup>2</sup>).

Изучение влияния режимов отпуска на свойства сварных соединений из стали 25ГС проводили на сварных темплетах толщиной 30...35 мм, вырезанных из металла опытной плавки (№ 1). Анализ полученных данных показал, что прочностные и пластические свойства основного металла практически не изменяются от параметров режима отпуска (температуры нагрева, времени выдержки и скорости охлаждения). При увеличении скорости охлаждения значения ударной вязкости основного металла и ОШЗ несколько возрастают. Увеличение времени выдержки при температуре отпуска 550 °С от 1 до 3 ч сопровождалось некоторым повышением значений ударной вязкости ОШЗ (рис. 2).

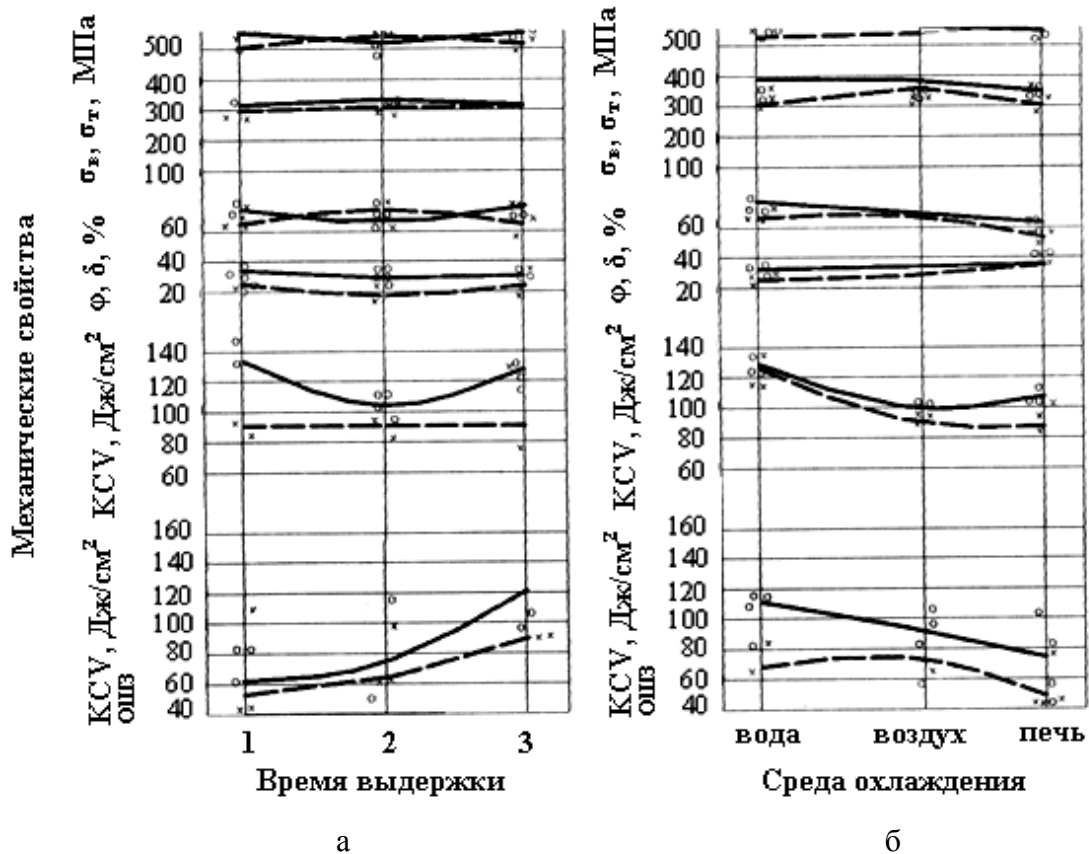


Рис. 2. Зависимость механические свойства основного металла и ударной вязкости ОШЗ при отпуске 550 °С от:  
 а – времени выдержки (охлаждение на воздухе); б – скорости охлаждения (выдержка – 2 ч)

Результаты испытания основного металла сварного соединения стали 25ГС опытной плавки на хладноломкость приведены на рис. 3.

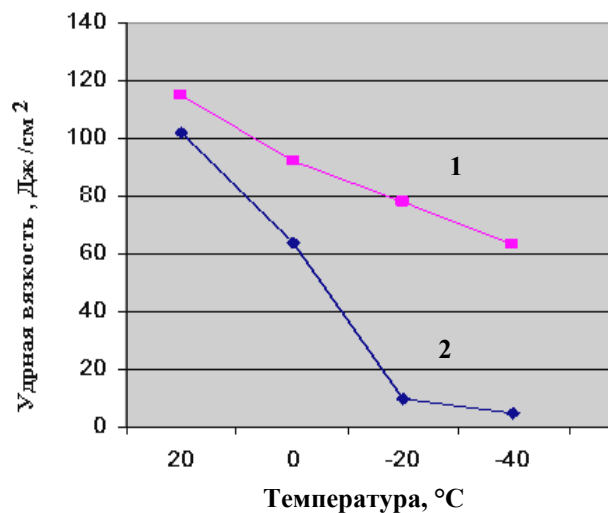


Рис. 3. Зависимость ударной вязкости основного металла от температуры:  
 1 – вакуумная разливка; 2 – воздух

Испытывали металл обеих плавки на старение: предварительная деформация растяжения металла на 10 %, изготовление стандартных ударных образцов, равномерный нагрев

на 250 °С (искусственное старение) с выдержкой в течение часа с последующим охлаждением на воздухе и испытание на маятниковом копре. Чувствительность к механическому старению определяли отношением изменения ударной вязкости после старения к ударной вязкости в исходном состоянии по формуле:

$$C = \frac{(A_H)_{исх} - (A_H)_{ст}}{(A_H)_{исх}}, \quad (1)$$

где  $(A_H)_{исх}$  – ударная вязкость образца в исходном состоянии;  $(A_H)_{ст}$  – ударная вязкость образца после старения.

Результаты испытаний представлены на рис. 4.

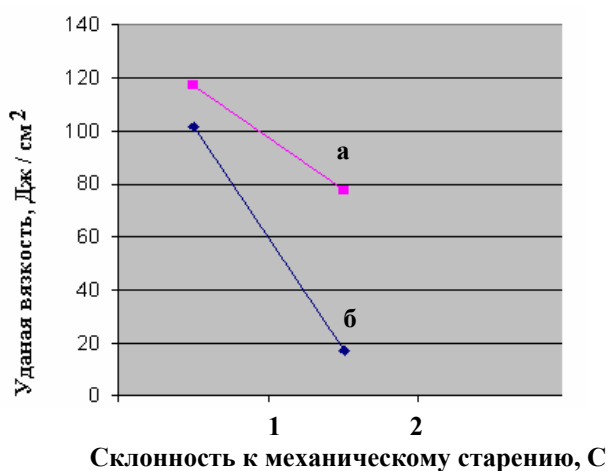


Рис. 4. Склонность к механическому старению (С – отношение ударной вязкости после (2) и до старения (1)); С<sub>а</sub> – вакуумированная сталь – 0,33; С<sub>б</sub> – не вакуумированная – 0,80: а – отливка в вакууме; б – отливка на воздухе

Данные, приведенные на рис. 3 и 4, показывают, что порог хладноломкости ниже и склонность к механическому старению меньше у стали 25ГС, разлитой в вакууме. Это объясняется повышенной чистотой вакуумированного металла, а также связанностью азота в прочные соединения с алюминием, содержание которого, как уже отмечалось, было у вакуумированной стали больше, чем у разлитой на воздухе.

## ВЫВОДЫ

Разливка стали 25ГС в вакууме увеличивает (по сравнению с нераскисленной и разлитой на воздухе) ударную вязкость околошовной зоны сварного соединения на 30 %, что позволяет отменить нормализацию после ЭШС.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Патон Б. Е. Электрошлаковая сварка. Перспективы развития / Б. Е. Патон, Д. А. Дудко, А. М. Пальти // Автоматическая сварка. – 1999. – № 9. – С. 4–6.
2. Суцук-Слюсаренко И. И. Технологические приемы воздействия на структуру и качество металла шва и околошовной зоны / И. И. Суцук-Слюсаренко, И. И. Лычко, В. М. Семенов // Основные и сварочные материалы для электрошлаковой сварки. – К. : Наукова думка, 1981. – С. 29–34.
3. Бондаренко О. П. Скоростная ЭШС толстолистового металла без нормализации сварных соединений / О. П. Бондаренко, А. А. Москаленко, В. Г. Тюкалов // Автоматическая сварка. – 1999. – № 9. – С. 29–30.