

ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА МНОГОКОМПОНЕНТНОГО ЛЕГИРУЮЩЕГО ПОКРЫТИЯ СВАРОЧНОГО ЭЛЕКТРОДА

Щ. Щерев, Ц. Абалжиева

(Университет Ботсваны)

Т.В. Ляшенко, В.А. Вознесенский

(Одесская государственная академия строительства и архитектуры,

г. Одесса, Украина)

Введение.

Проблемы повышения сопротивляемости сварных соединений образованию горячих трещин актуальна, особенно для высокопрочных и высоколегированных сталей, используемых на объектах с агрессивными средами. Горячие трещины возникают, если интенсивность нарастания деформаций в металле сварного соединения при остывании приводит к деформациям большим, чем его пластичность при данной температуре. Способность сварного соединения воспринимать без разрушения деформации, вызванные термомодеформационным циклом сварки, определяет уровень его технологической прочности. Сопротивляемость соединения появлению горячих трещин зависит от трех основных причин: от характера нарастания деформаций при охлаждении, от пластичности металла в температурном интервале хрупкости и от размера этого интервала. Чем меньше протяженность температурного интервала хрупкости, тем меньше вероятность возникновения трещин.

Среди способов повышения технологической прочности один из основных – изменение состава металла шва, в том числе за счет создания специальных образцов сварочных электродов. Моделирование использовалось при создании электрода [1] для сварки аустенитной стали X14AG15 ($Cr=14\%$, $Mn=15\%$, $N=0.23\%$), позволяющей заменять дорогие хромо-никелевые стали и обладающей повышенной прочностью на растяжение при сохранении высокой пластичности и ударной вязкости.

1. Условия эксперимента.

Качество металла сварного шва легированных сталей, помимо комплекса типичных механических параметров и показателей коррозионной стойкости, определяется их сопротивлением образованию горячих трещин. Критериями этого сопротивления являются, с одной стороны, температурные параметры кристаллизации металла в сварочном шве, а с другой – результаты специальных механических испытаний, характеризующих

трещиностойкость.

Процесс кристаллизации металла в сварочном шве оценивался по кривой «температура сплава T , К – скорость охлаждения $\partial T/\partial t$ », полученной дифференциально-термическим анализом. Точка начала резкого снижения скорости охлаждения соответствует температуре ликвидуса T_L , а точка, после которой скорость вновь возрастает – температуре солидуса T_S . Неравновесный температурный интервал кристаллизации (ТИК) это разность $\Delta T = T_L - T_S$. Трещиностойкость сварочного шва повышается при уменьшении ТИК за счет улучшения кристаллической структуры металла. Дополнительным температурным критерием технологической прочности шва является температура солидуса T_S , которую целесообразно повышать.

Механическим критерием технологической прочности шва является критическая скорость вынужденного деформирования образца, V_{cr} , mm/min, при которой начинается образование трещин. Она определялась на образце специальной формы по методике ВМЭИ [2]. Сварка проводилась электродами диаметром 4 мм, изготовленными из стали 1X18H10T. Сварочный ток 140...150 А, напряжение дуги 22...24 V, скорость сварки 9...10 м/ч.

Состав наплавленного металла регулировался легированием покрытия электродов. При этом шесть ингредиентов были стабилизированы - углерод (0.12 ± 0.01), марганец (8.6 ± 0.3), никель (16.0 ± 1.0), хром (19.0 ± 1.0), сера (0.025 ± 0.005) и фосфор (0.035 ± 0.005). Варьировались пять факторов - молибден $0 \leq Mo = X_1 \leq 2.5$, медь $0 \leq Cu = X_2 \leq 6.5$, кремний $0.85 \leq Si = X_3 \leq 1.05$, вольфрам $0 \leq W = X_4 \leq 3.5$ и ниобий $0.35 \leq Nb = X_5 \leq 1.4$. Погрешность воспроизведения уровней факторов 5...15% диапазона. Факторы X_1 , X_2 и X_3 изменялись через равные интервалы и были нормализованы по стандартной формуле, а четвертый и пятый, у которых центральный опыт был смещен от середины диапазона, нормализованы по нелинейным шкалам как $x_4 = 0.407X_4^{3.11} - 1$ и $x_5 = \log_2(1.429X_5)$.

Эксперимент поставлен по 21-точечному плану Рехтшафнера. Точка №22 с координатами $x_i = 0$ использовалась как контрольная. Таким образом, 8 электродов содержали пять легирующих ингредиентов, в шести отсутствовал Mo или Cu или W, в 6 – не было пары этих ингредиентов, а в 2 – были только Si и Nb. Из металла, наваренного 22 электродами, изготавливалось по 8-10 образцов для ДТА-измерения температур ликвидуса T_L и солидуса T_S ; среднеквадратичная ошибка эксперимента $s_{\{T\}} = 2.4$ К, что обуславливает ошибку разности $s_{\{\Delta T\}} = 3.35$ К. Для определения V_{cr} испытывалось не менее 4 образцов; $s_{\{V_{cr}\}} = 0.1$ mm/min.

Температурный интервал кристаллизации ΔT должен быть минимизирован

(граничный уровень $\Delta T \leq 60$ К), а температура солидуса – максимизирована ($T_s \geq 1480$ К). Критерий V_{cr} должен максимально превышать уровень $V_{cr} = 2$ mm/min, причем этому критерию отдается приоритет.

2. Пятифакторная модель влияния ингредиентов обмазки электрода на температурный интервал кристаллизации металла

Квадратичная модель (1) описывает влияние на ΔT пяти нормализованных факторов $x_i, i = 1, \dots, 5$.

$$\begin{aligned} \Delta T = 99.7 + & \bullet + 20.1x_1^2 \bullet \bullet + 3.1x_1x_4 + 1.8x_1x_5 \\ & + 6.1x_2 \bullet \bullet \bullet - 1.5x_2x_5 \\ & + 4.6x_3 - 15.5x_3^2 + 1.8x_3x_4 + 6.1x_3x_5 \\ & \bullet \bullet + 2.2x_4x_5 \\ & - 4.7x_5 - 20.3x_5^2. \end{aligned} \quad (1)$$

Из модели (1) при последовательном регрессионном анализе с учетом ошибки эксперимента $s_{\{\Delta T\}} = 3.35$ К удалены те 8 эффектов, для которых оценки коэффициентов оказались с риском $\alpha = 0.05$ неотличимыми от нуля. Модель адекватно описывает поле свойства [3 - 6], ТИК, с максимумом $\Delta T_{max} = 130.3$ К (при $x_1 = x_4 = -1, x_2 = +1, x_3 = 0.04$ и $x_5 = -0.24$) и минимумом $\Delta T_{min} = 43.4$ К (при $x_1 = 0.1, x_2 = x_3 = x_4 = -1$ и $x_5 = +1$). Относительные обобщающие числовые показатели данного поля – прирост $\delta = \Delta T_{max} / \Delta T_{min} = 3.0$ и индекс изменения качества $I\{\Delta T\} = (\Delta T_{max} - \Delta T_{min}) / (\Delta T_{max} + \Delta T_{min}) = 0.50$ - свидетельствуют о достаточно большой чувствительности ТИК к изменению состава покрытия сварочных электродов.

Поскольку технологический интерес вызывает подобласть минимума, именно для нее выполнен более подробный анализ. Специальные однофакторные функции построены так, чтобы четыре фактора, не являющиеся аргументами, находились на оптимальных уровнях, то есть при x_i , соответствующих ΔT_{min} . Оптимальная (с точки зрения наиболее узкого температурного интервала кристаллизации) обмазка электрода не должна содержать Cu, в ней должно быть мало Si, среднее количество Mo и повышенное содержание Nb. Влияние W на изменение ΔT в этой подобласти практически отсутствует.

3. Модели влияния ингредиентов обмазки электрода на критерии технологической прочности T_s и V_{cr}

По аналогичному алгоритму построены и проанализированы ЭСМ для температуры

солидуса (2) ($\alpha = 0.05$, $s_3\{T\} = 2.4$ К) и критической скорости вынужденного деформирования (3) ($\alpha = 0.05$, $s_3\{V_{cr}\} = 0.1$ mm/min).

$$\begin{aligned}
 T_s = & 1502 - 9x_1 - 20x_1^2 + 2x_1x_2 + 5x_1x_3 - 4x_1x_4 - 1x_1x_5 \\
 & - 10x_2 - 3x_2x_3 + 2x_2x_4 + 3x_2x_5 \\
 & - 17x_3 + 13x_3^2 - 4x_3x_5 \\
 & - 8x_4 + 6x_4^2 - 5x_4x_5 \\
 & - 6x_5 + 8x_5^2,
 \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
 V_{cr} = & 1.33 + 0.29x_1 - 0.47x_1^2 - 0.14x_1x_2 - 0.08x_1x_4 \\
 & - 0.20x_2 - 0.31x_2^2 - 0.06x_2x_4 - 0.24x_2x_5 \\
 & - 0.06x_3 - 0.07x_3x_5 \\
 & + 0.38x_4^2 + 0.16x_4x_5 \\
 & + 0.24x_5 + 0.20x_5^2.
 \end{aligned} \tag{3}$$

Координаты оптимальных точек для каждого из трех критериев технологической прочности сварного шва собраны в таблице.

По этим результатам можно сделать важное заключение о том, что Si может быть стабилизирован на нижнем уровне варьирования (0.85%), а Nb – на верхнем (1.4%); дальнейший анализ и принятие оптимальных инженерных решений допустимо вести по трехфакторным полям $Y(x_1, x_2, x_4)$.

Фактор	Критерии		
	ΔT_{min}	$T_{s,max}$	$V_{cr,max}$
$X_1(Mo)$	+0.04	-0.35	+0.55
$X_2(Cu)$	-1	-1	-0.90
$X_3(Si)$	-1	-1	-1
$X_4(W)$	-1	-1	+1
$X_5(Nb)$	+1	+1	+1

4. Критерии ΔT , T_s и V_{cr} при оптимальном содержании в покрытии Si и Nb

Изменение критериев технологической прочности металла сварного шва при фиксированном содержании Si=0.85% и Nb=1.4% описываются трехфакторными моделями,

которые получаются при подстановке в модели (1-3) оптимальных уровней $x_3 = -1$ и $x_5 = +1$.

Эти модели отображены изоповерхностями на рис. 1.

Для первых двух критериев оптимальные решения лежат строго в плоскости, соответствующей сплавам без меди. Для V_{cr} переход к этой плоскости от точки максимума ($x_2 = -0.87$, или 0.4% Cu) практически не может изменить качество сварного шва. Поэтому целесообразно зафиксировать $x_2 = -1$ и дальнейший анализ проводить на фронтальной плоскости $\{x_1, x_3\}$.

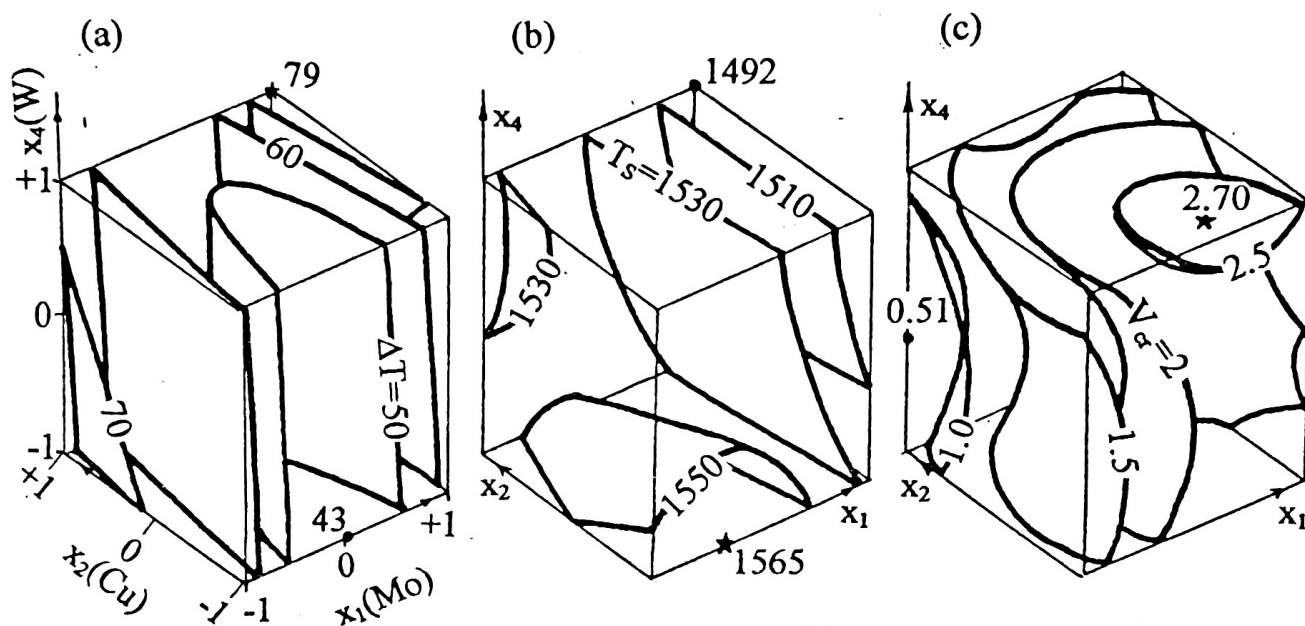


Рис. 1. Изоповерхности трех критериев технологической прочности.

5. Подобласть допустимых составов при выполнении требований к трем критериям технологической прочности

Температурный интервал кристаллизации ΔT должен быть меньше 60 К; температура солидуса – выше 1530 К, скорость вынужденного деформирования должна максимально превышать уровень $V_{cr} = 2 \text{ mm/min}$, причем, как указывалось выше, этому критерию отдается приоритет. Если на плоскости $\{x_1, x_3\}$ выделить и запретить подобласти, в которых любое из этих трех требований не выполняется, то будет ограничена подобласть допустимых составов.

Подобласть допустимых решений показана на рис. 2, причем нормализованные факторы x_1 и x_4 преобразованы в натуральные переменные по соотношениям:

$$\text{Mo} = 1.25 \cdot (x_1 + 1),$$

$$W = 2.8 \cdot (x_4 + 1)^{0.322}$$

Основные ограничения касаются содержания молибдена. Нижний уровень (0.25...1.25%) ограничивается скоростью вынужденного деформирования V_{σ} , а верхний (1.5...2%) – температурными критериями.

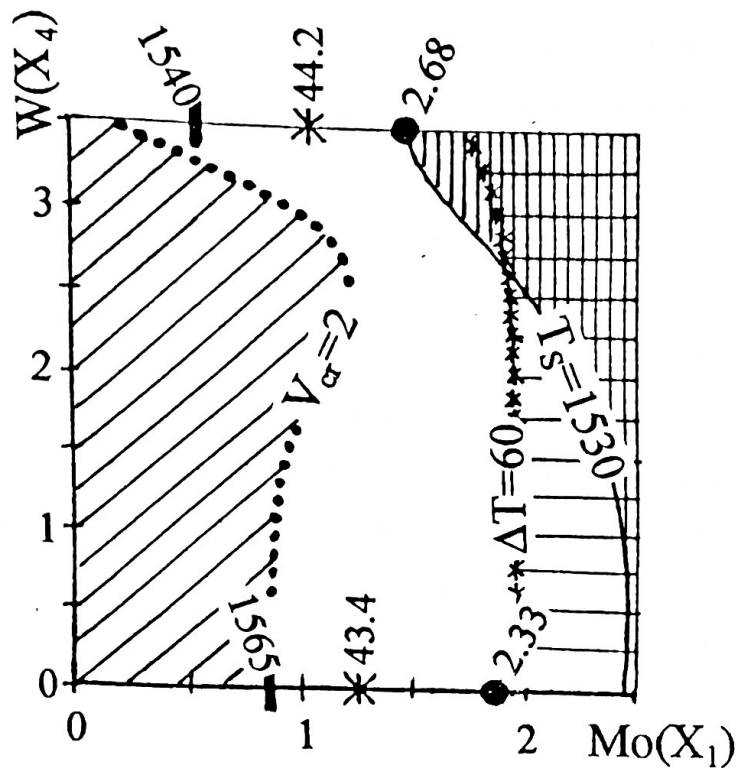


Рис. 2. Подобласть допустимых решений.

Содержание вольфрама в подобласти допустимых решений может быть любым в диапазоне 0...3.5%, однако, с учетом приоритета критерия V_{σ} предпочтительно повышенное содержание вольфрама, поскольку при $W = 3.5\%$ скорость вынужденного деформирования возрастает на 15%, а критерии, связанные с процессом кристаллизации металла в сварном шве, ухудшаются незначительно.

6. Выводы

Результаты экспериментально-статистического моделирования позволили предложить такой состав легирующего покрытия электродов для сварки нержавеющей стали, который обеспечивает, во-первых, критическую скорость вынужденного деформирования наваренного металла шва более 2.5 mm/min, во-вторых, стабильную его структуру с узким диапазоном температуры кристаллизации при повышенной температуре солидуса, а также прочность более 500 МПа и высокую коррозионную устойчивость.

Литература

1. Щерев Щ. Изследване влиянието на някои легиращи елементи върху технологичната якост във връзка с разработване на електроди за заваряване на високолегирани неръждаващи аустенитни стомани / Автореферат...канд. техн. науки. – София, 1984. Теория сварочных процессов / под ред. В.В. Фролова. – М.: Высшая школа, 1988.
2. Желев А. Машина за изпитване съпротивлението на метала на шева срещу образуване и разпространение на горещи пукнатини ВМЕИ-1-1 // Заваряване, 1977, №3.
3. Voznesensky V., Lyashenko T. Experimental-Statistical Modelling in Computational Materials Science. – Odessa: Astroprint, 1998.
4. ЭВМ и оптимизация композиционных материалов/ В.А. Вознесенский, Т.В. Ляшенко, Я.П. Иванов, И.И. Николов. - К.: Будивэльнык, 1989.
5. Voznesensky V.A., Lyashenko T.V. Modelling, analysis and optimization of brittle matrix composites properties fields// Brittle Matrix Composites 4 : Proc. IV Int.Symp. BMC 4, Eds. A.M.Brandt, V.C.Li and I.H.Marshall. - Cambridge and Warsaw : Woodhead Publ. Ltd., 1994.
6. Lyashenko T.V. , Voznesensky V.A. Modeling and analysis of varying correlation between properties of brittle matrix composites// Brittle Matrix Composites 5 : Proc. V Int.Symp. BMC 5, Eds. A.M.Brandt, V.C.Li and I.H.Marshall. - Cambridge and Warsaw : Woodhead Publ. Ltd., 1997.