



ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА ДУГОВОЙ СВАРКИ В УЗКИЙ ЗАЗОР ЗАКАЛИВАЮЩИХСЯ СТАЛЕЙ БЕЗ ПОДОГРЕВА

А. Т. НАЗАРЧУК, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Предложен инженерный расчет оптимальной скорости охлаждения свариваемого металла (с обеспечением технологической прочности) в зависимости от параметров процесса сварки и сечения слоев шва, а также с учетом термомеханических диаграмм распада переохлажденного аустенита.

Ключевые слова: дуговая сварка, закаливающиеся стали, многослойные швы, сварные соединения, замедленное разрушение, холодные трещины, порционное тепловложение

Так сложилось, что дуговую сварку плавлением закаливающих корпусных сталей для обеспечения требуемой стойкости соединений против образования холодных трещин выполняют зачастую с применением высоколегированных аустенитных сварочных материалов [1]. При использовании низколегированных сварочных материалов приходится прибегать к подогреву. В некоторых случаях желаемого результата удается добиться при помощи автоподогрева.

Недостатками этих технологий являются, во-первых, высокая стоимость аустенитных материалов и более низкие показатели свойств соединений, по сравнению с основным металлом; во-вторых, — необходимость дополнительного применения сложной и трудоемкой операции подогрева, не всегда осуществимой, особенно для крупногабаритных изделий.

В последнее время для сварки закаливающих сталей разрабатываются высокопрочные аустенитно-мартенситные сварочные материалы [2]. При их использовании, помимо отмеченных недостатков, следует указать на невозможность применения последующей термообработки, например высокого отпуска, для снятия остаточных напряжений.

С учетом изложенного полагаем, что перспективным вариантом для сварки закаливающих трудносвариваемых сталей является возможность получения металла высокопрочных сварных швов, близкого к основному металлу.

Однако для реализации этого предложения необходимы дополнительные исследования, направленные на достижение требуемой технологической прочности сварных соединений закаливающих сталей при одновременном повышении прочности металла сварных швов до уровня таковой основного металла. Решение этой задачи может быть достигнуто путем сочетания различных вариантов автоподогрева и порционно-дискретного формирования сварных швов [3–5].

В случае автоподогрева, например с применением возвратно-поступательных перемещений дуги (электрода) [3], его преимущества могут быть реализованы, если максимально оптимизировать ско-

рость охлаждения металла при выполнении каждого слоя шва.

Цель работы — показать возможность повышения стойкости металла соединений против холодных трещин без применения подогрева при сварке закаливающих сталей с получением металла швов, аналогичного основному металлу, благодаря оптимизации охлаждения металла при выполнении каждого отдельного слоя сварного шва.

С учетом отрицательного влияния водорода на технологическую прочность соединений предпринимали меры по ограничению содержания диффузионно-подвижного водорода в наплавленном металле, которое не превышало $1,5 \text{ см}^3$ на 100 г металла. Для определения содержания водорода использовали метод спиртовой пробы.

Чтобы оптимизировать охлаждение сварных соединений после выполнения каждого слоя с учетом термомеханических диаграмм распада переохлажденного аустенита конкретной стали, необходимо установить требуемые скорости охлаждения металла шва, ЗТВ в зависимости от условий сварки.

При сварке корневых швов в узкий зазор металла больших толщин для оценки теплового состояния свариваемых элементов можно воспользоваться расчетной схемой Н. Н. Рыкалина, учитывающей распространение тепла в полубесконечном теле от воздействия точечного подвижного источника нагрева [6, 7]. В соответствии с этой схемой температура любой точки тела в квазистационарном состоянии определяется по следующей формуле [7]:

$$T_{(R, x)} = \frac{q}{2\pi\lambda R} e^{-\frac{v}{2a}(x+R)}. \quad (1)$$

При перемещении источника по оси $x-x$, температура точек (где значения x являются отрицательными) не зависит от скорости его перемещения и равна температурам предельного состояния неподвижного источника, т. е. при $R = -x$

$$T_R = \frac{q}{2\pi\lambda R}. \quad (2)$$

Для низкоуглеродистой стали $\lambda = 41,8 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ [7]. Учитывая, что $q = I_{\text{св}} U_{\text{д}} \varphi$ (φ — коэффициент полезного действия дуги), равенство (2) можно записать в виде

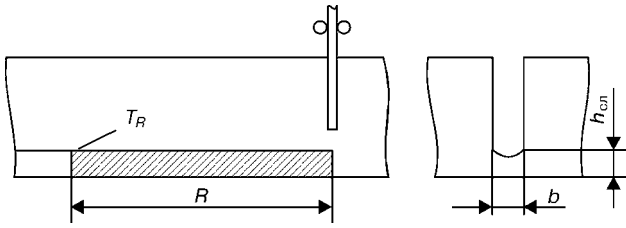


Рис. 1. Схема расчетного определения ширины разделки в зависимости от количества наплавленного металла

$$R = \frac{I_{св} U_{д}}{2\pi\lambda T_R} \phi \quad (3)$$

где R — расстояние по оси шва от дуги до точки с температурой T_R , м; $I_{св}$ — сварочный ток, А; $U_{д}$ — напряжение на дуге, В; T_R , °С.

В ЗТВ (на оси y) распределение температур зависит от скорости сварки [6, 7]. Однако поскольку ЗТВ при сварке в узкий зазор невелика и находится практически на одном и том же расстоянии от оси шва, т. е. $b/2$ (где b — ширина зазора), что для зазоров шириной 14...18 мм составляет 7...9 мм, то расчет с определенной степенью точности можно выполнять без учета этого замечания.

Действительно, как следует из таблицы, при сварке щитов толщиной 40 и 80 мм размером 1200×1600 мм (шов посередине вдоль длинной стороны) расчетные оценки величины R для температур 220...275 °С отличаются от экспериментальных на 6...15 %, что вполне допустимо для инженерных оценок.

Подставляя в формулу (3) соответствующие значения λ и принимая во внимание, что в расчетах такого рода ϕ можно принять равным 1 (для газоэлектрической сварки на открытой поверхности $\phi = 0,8...0,9$), получим

$$R = \frac{I_{св} U_{д}}{2\pi\lambda 1,8T_R} \quad (4)$$

Для оптимизации ширины разделки при сварке в узкий зазор закаливающихся сталей важным показателем является определение расстояния от дуги до зоны металла с интересующей нас температурой автоподогрева в зависимости от параметров сварки. Это расстояние может быть определено как экспериментально, так и весьма приближенно расчетным путем.

Если соответствующие замеры или расчеты выполнить для двух температур, например 500 и 300 °С, то можно ориентировочно определить и среднюю скорость охлаждения металла в зоне свар-

ки в этом диапазоне температур. В данном случае используется традиционный анализ термокинетических диаграмм распада переохлажденного аустенита свариваемых сталей для оценки структур, образующихся в металле ЗТВ сварных соединений.

В дальнейшем поступим следующим образом. Предположим, что нам необходимо обеспечить распределение температур T_R на оси шва на расстоянии R от дуги при y и $z = 0$ (рис. 1).

Для сварки в узкий зазор с учетом количества наплавленного металла за время t можно составить следующее уравнение:

$$bh_{сл}R\gamma = Pt, \quad (5)$$

где $h_{сл}$ — высота слоя; γ — удельная плотность наплавленного металла (для стали $7,78 \cdot 10^{-3}$ г/мм³); P — количество наплавленного металла в единицу времени для выбранных параметров процесса (г/с). При этом $t = R/v_{св}$, где $v_{св}$ — скорость сварки при выбранных значениях $I_{св}$ и $U_{д}$.

Для преобразования формулы (5) отметим, что $\psi_{сл} = b/h_{сл}$, откуда $h_{сл} = b/\psi_{сл}$. Подставим это выражение в формулу (5) и, произведя соответствующие преобразования, получим расчетную ширину разделки (зазора) для выбранных значений сварочного тока и напряжения на дуге при сварке в узкий зазор:

$$b = \sqrt{\frac{P\psi_{сл}}{R\gamma}} t, \quad (6)$$

где $\psi_{сл}$ — коэффициент формы слоя (отношение ширины разделки к высоте наплавленного слоя $h_{сл}$); R определяется расчетным путем по формуле (4) или экспериментально; t — время охлаждения до температуры T_R , при котором в металле соединений не образуются закалочные структуры, склонные к холодным трещинам, с.

Параметр $t = t_R$ выбирается с учетом термокинетических диаграмм распада переохлажденного аустенита конкретных свариваемых сталей (рис. 2).

Принимая во внимание, что $R = v_{св}t$, конечная формула определения ширины зазора при сварке в узкий зазор может быть приведена к виду

$$b = \sqrt{\frac{P\psi_{сл}}{v_{св}\gamma}} \quad (7)$$

Для широкого диапазона режимов $P = 6,5...8,5$ кг/ч и может быть определено по формуле $P = pv_{п.п}$, где p — масса погонной длины проволоки 1 м, кг/м; $v_{п.п}$ — скорость подачи проволоки, м/ч.

Таблица 1. Оптимизация параметров процесса сварки однородными швами закаливающихся сталей

Марка стали	Размеры свариваемых заготовок, мм	Параметры сварки		Температура автоподогрева T_R , °С	R, мм	
		$I_{св}$, А	$U_{д}$, В		экспериментальное	расчетное
14ХН4МДА	1200×1600×40	450...475	36...38	220...230	255	292...301
		455	37	225		297
30Х2Н2М	120×1600×80	450...500	38...40	250...275	265	271...288
		475	39	262,5		280

Примечание. В числителе дан разбег значений, в знаменателе — среднее.



Значения коэффициента формы слоя $\psi_{сл}$ следует принимать такими, при которых обеспечивается достаточная стойкость металла швов против образования горячих трещин. Для сварки в узкий зазор $\psi_{сл} = 2,5...5,5$.

Пользуясь термокинетическими диаграммами распада переохлажденного аустенита для конкретных сталей, с учетом выбора структур металла, стойких против холодных трещин, можно определить не только T_R , но и время t достижения этой температуры при охлаждении от температур аустенизации. В тех случаях, когда не имеется соответствующих термокинетических диаграмм распада (для конкретных сталей), построенных при нагреве до высоких температур (1300...1350 °C), можно ориентировочно (как предварительные) использовать диаграммы для термической обработки [8].

Выбрав T_R , по формуле (4) определяют R при заданных $I_{св}$ и U_d . Скорость сварки для выбранных параметров процесса находят из соотношения $v_{св} = R/t$. Затем по формуле (7) вычисляют требуемую ширину зазора, поскольку при заданных параметрах процесса легко определить P . Впрочем, можно поступить и иначе — задав производительность P , определить требуемые $I_{св}$ и U_d .

Выполнив расчеты, в том числе и по определению ширины зазора b , можно обнаружить любопытный факт: обеспечить расчетную ширину шва при выбранных значениях сварочного тока и напряжения на дуге в ряде случаев невозможно, поэтому следует применять поперечные колебания электрода. При этом амплитуду A колебаний ориентировочно определяют на основании экспериментальных данных

$$A = \frac{b - (2...5)}{2}$$

Выбор оптимального варианта производят методом последовательных приближений, для чего расчеты приходится выполнять для нескольких вариантов параметров процесса ($I_{св}$ и U_d).

Следует отметить, что при разных условиях производительность однозначно определяется отношением P/b и повышается с увеличением этого показателя. Причем уменьшение ширины зазора не всегда способствует повышению производительности процесса, поскольку с уменьшением зазора для обеспечения качественного формирования шва (в частности стойкости против образования горячих трещин) приходится уменьшать количество наплавленного металла в единицу времени. Возможны случаи, когда при больших зазорах может быть обеспечена более высокая производительность процесса, чем при меньших. Это достигается путем существенного повышения количества наплавленного металла в единицу времени (для больших зазоров) и обеспечения требуемого коэффициента формы слоя $\psi_{сл}$ для сварки в узкий зазор.

Предложенную методику расчета можно использовать при сварке с традиционной разделкой кромок. В этом случае в первую очередь целесообразно определить площадь поперечного сечения

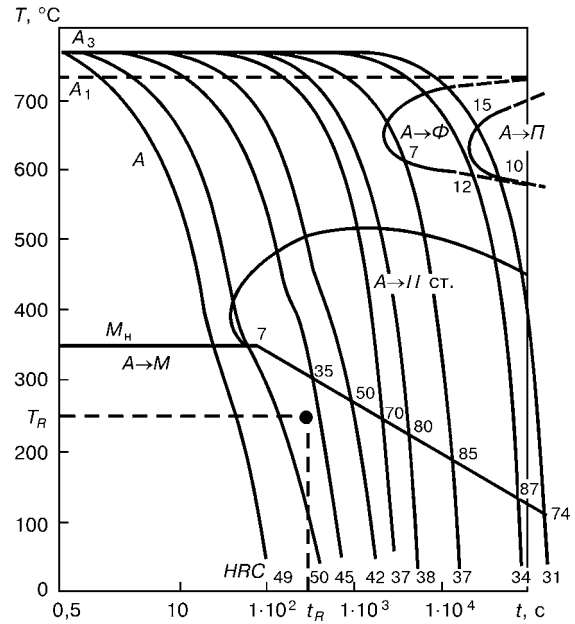


Рис. 2. Термокинетическая диаграмма распада переохлажденного аустенита в стали марки 30X2H2M

наплавляемого слоя S и с учетом этого выполнить обычную разделку кромок. Площадь поперечного сечения слоя определяется по формуле

$$S = \frac{Pt}{R\dot{\gamma}}$$

Учитывая, что $R = v_{св}t$, формула может быть приведена к виду

$$S = \frac{P}{v_{св}\dot{\gamma}}$$

Здесь уместно отметить, что предлагается по сути новый подход к выбору сечения разделки и амплитуды поперечных колебаний электрода расчетным путем в зависимости от параметров процесса и с учетом стойкости соединений конкретных свариваемых сталей против холодных и горячих трещин.

В настоящее время параметры процесса (с учетом марки свариваемых сталей) выбирают, как правило, в зависимости от регламентированной разделки кромок. Такой подход не всегда позволяет обеспечить необходимую скорость охлаждения металла в нижнем субкритическом интервале температур для многих трудносвариваемых сталей, а следовательно, и стойкость металла их соединений против холодных трещин.

Проверку разработанной методики выбора режимов осуществляли при сварке заготовок из сталей марок 14XН4МДА и 30X2H2M толщиной соответственно 40 и 80 мм. Заготовки размером 600×700 мм собирали в виде жесткой технологической пробы по типу ЦНИИТС. Шов выполняли вдоль длинной стороны заготовок. Применяли сварочную проволоку Св-07ХГСНЗМД. Расчетная ширина разделки при выбранных параметрах процесса, например для стали марки 30X2H2M, составляла 21...23 мм. Остальные параметры следующие: $I_{св} = 450...500$ А; $U_d = 38...40$ В; $v_{св} = 8,1$ м/ч.

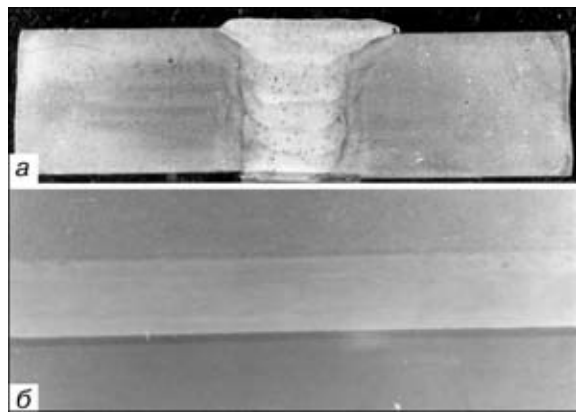


Рис. 3. Макрошлиф соединения стали 14ХН4МДА, выполненного при расчетной ширине зазора: а — поперечный; б — продольный

Термокинетическая диаграмма распада переохлажденного аустенита для стали 30Х2Н2М представлена на рис. 2 [5, 8]. Температура $T_R = 230...250\text{ }^\circ\text{C}$, при этом в соответствии с диаграммой необходимо было обеспечить $t = t_R = 150$ и 190 с. Упомянутое требование определяется формированием структур металла (в результате распада аустенита и развития процессов самоотпуска при сварке), стойких против образования холодных трещин. Дальнейшие расчеты выполняли с использованием изложенной методики.

Результаты исследований показали, что в сварных соединениях продольные и поперечные холодные трещины не обнаружены (рис. 3). Это свидетельствует о достаточной стойкости металла соединений против образования холодных трещин при сварке по выбранной технологии.

Следует отметить, что несмотря на возможность получения соединений, стойких против образования трещин без применения подогрева (в результате оптимизации охлаждения в процессе сварки отдельного слоя), применять этот способ для соединения трудносвариваемых сталей с высокой устойчивостью аустенита, например стали 34ХН3М, не всегда можно. Дело в том, что оптимизация скорости охлаждения соединений таких сталей при выполнении только одного слоя шва на оптимальных режимах может привести к ухудшению механических свойств металла шва из-за длительного пребывания выше A_{c3} . Для устранения этого недостатка предлагаемую методику расчета необходимо сочетать с использованием полезного воздействия многослойности швов [5] и их порционно-дискретного формирования [3, 4].

Таким образом, оптимизация параметров сварки и автоподогрева (длина участка автоподогрева, температура) основывается на необходимости обеспечивать на определенном расстоянии от дуги температуру автоподогрева металла в зоне сварки, при которой удастся предотвратить образование

холодных трещин с учетом своевременного повторного теплового воздействия дуги на этот металл. Такое повторное воздействие рекомендуется осуществлять один или два раза за один проход. Для реализации процесса используют двухдуговую сварку и сварку одной дугой по схеме «за один проход выполняется два или три слоя», что особенно необходимо для корневых швов. При достижении необходимой температуры автоподогрева сварку можно выполнять по схеме «один проход один слой».

Разработанный подход оптимизации ширины разделки (сварка в узкий зазор) или сечения наплавленного слоя (сварка с традиционной разделкой) может использоваться при сварке сталей не только с целью обеспечения необходимой стойкости соединений против образования трещин, но и для получения требуемых механических свойств металла сварных соединений.

Выводы

1. Разработан инженерный расчет скорости охлаждения металла в зависимости от параметров процесса сварки и сечения слоев шва с учетом использования термокинетических диаграмм распада переохлажденного аустенита свариваемой стали.
2. Установлена возможность обеспечения требуемой стойкости соединений трудносвариваемых сталей марок 14ХН4МДА и 30Х2Н2М против образования трещин за счет оптимизации скорости охлаждения металла в процессе сварки без применения подогрева.
3. Для повышения эффективности процесса сварки сталей с высокой устойчивостью распада переохлажденного аустенита (без применения подогрева) требуется совершенствование методики расчета применительно к выполнению многослойных швов с порционно-дискретным формированием.

1. *Технология* электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. Б. Е. Патона. — М.: Машиностроение, 1974. — 768 с.
2. А. с. 880671 СССР, МПК В 23 К 28/00. Способ дуговой сварки закаляющихся сталей / Ю. Н. Готальский, В. В. Снисарь, А. Л. Купорев и др. — Опубл. 14.07.81, Бюл. № 42.
3. Назарчук А. Т. Управление кристаллизацией металла шва и термодформационным циклом при автоматической дуговой сварке // Автомат. сварка. — 1994. — № 5/6. — С. 3–9.
4. Назарчук А. Т. Влияние порционно-дискретного формирования швов на термический цикл дуговой сварки плавлением // Там же. — 1997. — № 5. — С. 13–17.
5. Назарчук А. Т. Стойкость соединений закаляющихся сталей с многослойными швами против образования холодных трещин // Там же. — 1994. — № 1. — С. 15–19.
6. Рыкалин Н. Н. Расчет тепловых процессов при сварке. — М.: Машгиз, 1951. — 296 с.
7. Петров Г. Л., Тумарев А. С. Теория сварочных процессов. — М.: Высш. шк., 1967. — 508 с.
8. Попов А. А., Попова Л. Е. Изотермические и термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита. Справочник термиста. — М.: Металлургия, 1965. — 500 с.

Suggested is an engineering calculation of the optimal rate of cooling of metal welded (ensuring process strength) depending upon the welding process parameters and section of the weld layers, and allowing for the overcooled austenite CCT diagrams.

Поступила в редакцию 21.09.99,
в окончательном варианте 03.03.2003