

УДК 621.791.75

Размышляев А. Д., Агеева М. В.**О СЛОИСТОСТИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ МЕТАЛЛА ШВА ПРИ
ДУГОВОЙ СВАРКЕ И ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРАХ
УПРАВЛЯЮЩИХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ**

В фундаментальном труде [1] были обобщены результаты исследований о процессе первичной кристаллизации металла ванны при электродуговой сварке под флюсом. Здесь рассмотрены данные, опубликованные с 1947 года. Отмечено, что скорость роста кристаллов в ванне периодически изменяется, и в структуре швов наблюдают кристаллизационные слои. Толщина этих слоев возрастает по мере удаления от периферии ванны к ее центру. Толщина слоев измеряется долями миллиметра. В тех участках шва, где скорость охлаждения наибольшая, толщина слоя получается наименьшей. В работе [1] и работе [2] отмечается, что по слоям кристаллизации (в поперечном их сечении) наблюдается значительная химическая неоднородность по отдельным элементам, и, в частности, (особенно) по сере. Методом радиографического исследования показано, что каждый кристаллизационный слой состоит из трех характерных участков:

- нижний начальный участок с наибольшим содержанием углерода, серы и фосфора;
- средний участок, в котором содержание легирующих элементов (а также S и P) отвечает среднему содержанию этих элементов в металле шва;
- верхний участок с пониженным содержанием указанных элементов.

В дальнейшем во всех работах, например, в [3, 4], трактуется именно такое строение кристаллизационных слоев в сварных швах. В работах [5–7] это также было подтверждено и подробно рассмотрен механизм формирования химической неоднородности (распределения легирующих элементов, а также P и S) по сечению слоя. В работе [7] объяснена связь между периодами остановок в процессе кристаллизации слоя и процессом диффузии легирующих элементов (а также S и P) на границе: твердый металл-жидкость. Эти данные, на наш взгляд, имеют большое теоретическое значение и могут быть основой для уменьшения неоднородности в шве, в частности, в пределах каждого слоя, которые, как оказывалось, состоят из трех участков.

На наш взгляд, данные о процессе формирования неоднородности химического состава в пределах кристаллизационного слоя, а также о размерах (в сечении) этого слоя могут быть важными при назначении оптимальной частоты управляющих внешних воздействий для измельчения размеров структурных составляющих швов и уменьшения их химической неоднородности.

Целью настоящей работы является рассмотрение особенностей формирования кристаллизационных слоев в сварном шве для назначения оптимальных параметров (частоты и индукции) управляющих магнитных полей при дуговой сварке.

Рассмотрим подробнее этот вопрос. В работе [8] при дуговой сварке сплава 10X11H20T2P толщиной 2 мм вертикальные колебания горелки в диапазоне частот 0...30 Гц и амплитудой от 1 до 5 мм привели к колебанию в металле ванны температуры и давления. При этом при частоте пульсации 12 Гц фронт кристаллизации при затвердевании металла шва также колебался с частотой 12 Гц. Позже, в работах [9, 10] для измельчения зерна в шве также было предложено синхронизировать частоту внешних воздействий (тепловых, электромагнитных и др.) с частотой кристаллизации металла сварных швов. При этом автор работ [9, 10] выполнил большой объем исследований по установлению собственной частоты

кристаллизации швов при дуговой сварке без внешних воздействий для ряда чистых металлов и сплавов. Он так определяет собственную частоту кристаллизации, которая является основным параметром периодичности:

$$f_{кр} = V_{св} / \Delta x,$$

где $V_{св}$ – скорость сварки, м/с; Δx – шаг, как расстояние между изотермами, зафиксированными в микро- (макро-) структуре швов, м.

Он показал, что $f_{кр}$ зависит от химического состава металла, толщины свариваемого металла (δ), скорости сварки ($V_{св}$) и от удельной погонной энергии – $q/V_{св}\delta$ (q – тепловая энергия сварочной дуги, Дж/м). Он приводит формулы (установленные путем математической обработки экспериментальных данных) и графики, устанавливающие связь между $f_{кр}$ и скоростью сварки $V_{св}$. Однако данные этих работ относятся к дуговой сварке неплавящимся электродом в аргоне металлов и сплавов толщиной до 5 мм (чаще 1...3,5 мм). Применительно к автоматической электродуговой сварке проволокой диаметром 3...5 мм под флюсом значения $f_{кр}$ еще не определялись. Имеются лишь разрозненные данные. В работе [5] для автоматической дуговой сварки показано, что толщина слоя в структуре швов составляет $\Delta x = (0,1...0,2) \cdot 10^{-3}$ м, а в работе [6] указано, что Δx может составлять не только $(0,1...0,2) \cdot 10^{-3}$ м, но и $0,35 \cdot 10^{-3}$ м. Таким образом, системных данных о величинах Δx , $f_{кр}$ для процесса дуговой сварки (в том числе и под слоем флюса) малоуглеродистых, низко- и высоколегированных сталей (сплавов) практически нет. В этой ситуации можно лишь ориентировочно определить значение оптимальной частоты воздействия магнитных полей (продольного магнитного поля (ПРМП) и поперечного магнитного поля (ПОМП)) при автоматической дуговой сварке под флюсом, используя данные о величине Δx из работ [5, 6].

Если принять, что при дуговой сварке проволокой под флюсом скорость сварки $V_{св} = 30$ м/ч = $8,3 \cdot 10^{-3}$ м/с, а величина $\Delta x = 0,1 \cdot 10^{-3}$ м, то:

$$f_{кр} = V_{св}/\Delta x = 8,3 \cdot 10^{-3}/0,1 \cdot 10^{-3} = 83 \text{ Гц.}$$

Если $\Delta x = 0,2 \cdot 10^{-3}$ м, то $f_{кр} = 41,5$ Гц.

Если $\Delta x = 0,35 \cdot 10^{-3}$ м, то $f_{кр} = 24,3$ Гц.

Таким образом, ориентировочный диапазон частот управляющих магнитных полей (ПРМП, ПОМП) должен быть в пределах $f = 24...83$ Гц.

Для получения более точных значений оптимальных частот управляющих ПРМП, ПОМП необходимо знать точные значения Δx , которые, как показано в работах [9, 10] зависят от δ , $V_{св}$, $q/V_{св}\delta$, а также от химического состава свариваемых пластин. Это требует выполнения значительного объема экспериментов. Кстати, как указано в работах [1, 2, 5], определение значений Δx требует большого опыта, чтобы выявить кристаллизационные слои в поперечных (либо продольных) шлифах в макро-, либо микроструктуре швов.

Таким образом, если принять, что для назначения оптимальной частоты воздействия ПРМП и ПОМП применительно к процессу автоматической дуговой сварки проволокой под флюсом справедливы положения, высказанные в работах [9, 10], то оптимальной будет частота (ориентировочно) $f = 24...83$ Гц. Однако это требует дальнейшей экспериментальной проверки. Следует отметить, что при обработке наших данных получается следующее [11]. Выполняли сварку встык пластин из стали ВМСтЗсп толщиной 4мм ($S = 4$ мм) на флюсомедной подкладке проволокой Св-08А диаметром 3 мм под флюсом АН-348А.

Режим сварки: $I_{св} = 320...350$ А; $U_{д} = 32...34$ В, $V_{св} = 30$ м/ч с воздействием ПОМП и ПРМП как постоянных, так и знакопеременных частотой $f = 6; 12; 24; 50$ Гц при величине

индукции у поверхности ванны в зоне под электродом $B_y = 25$ мТл (для ПОМП) и $B_z = 25 \dots 30$ мТл (для ПРМП). Все исследования выполняли при поперечном относительно оси шва расположении стержней УВ ПОМП.

Из сварных соединений вырезали образцы для испытаний на разрушение.

Форма образца соответствовала требованиям ГОСТа 6996-66 (тип XXIV).

Определяли прочность металла шва стыковых соединений при сварке образцов. Испытания проводили на разрывной машине с максимальным усилием 5 т.

После испытаний на разрыв определяли значения предела прочности (σ_B).

Данные исследований по сварке образцов (средние значения из 3-х образцов) с воздействием ПОМП частотой $f = 6 \dots 50$ Гц приведены в табл. 1.

Таблица 1

Влияние частоты ПОМП на изменения σ_B ($\Delta\sigma_B$) сварных соединений

Показатели	Частота ПОМП, Гц			
	6	12	24	50
Изменение σ_B ($\Delta\sigma_B$), %	+ 8,25	+ 11,5	+ 6,0	+ 6,0

Следовательно, оптимальной является частота ПОМП в пределах 6...12 Гц (при уровне индукции $B_y = 25 \dots 30$ мТл в головной части ванны).

При сварке образцов с воздействием ПРМП значения σ_B увеличиваются до частоты 24 Гц, а при частоте 50 Гц практически не увеличивались (табл. 2).

Таблица 2

Влияние частоты ПРМП на изменения показателя σ_B ($\Delta\sigma_B$) сварных соединений

Показатели	Частота ПРМП, Гц			
	6	12	24	50
Изменение σ_B ($\Delta\sigma_B$), %	+ 11,8	+ 13,6	+ 16,8	+ 3,0

Следовательно, оптимальной является частота ПРМП 24 Гц при уровне продольной компоненты индукции ПРМП $B_z = 25 \dots 30$ мТл. Показатели ударной вязкости металла швов при сварке с воздействием ПОМП или ПРМП не снижались. Установлено также, что при сварке с воздействием ПОМП и ПРМП несколько измельчались структурные составляющие металла швов (феррит + перлит).

В наших экспериментах длина сварочной ванны составляла $L_B = 35$ мм. Учитывая, что при дуговой сварке максимальная скорость потоков не превышает $V = 15 \cdot 10^{-2}$ м/с, то время переноса жидкого металла ванны из головной части в хвостовую ее часть составляло: $t = L_B/V_{CB} = 35 \cdot 10^{-3}/15 \cdot 10^{-2} = 2,33$ с, что соответствует частоте знакопеременного ПОМП, либо ПРМП: $f = 1/2t = 1/4,66 = 2,15$ Гц.

Эта частота (2...3 Гц) не соответствует частоте, полученной при испытаниях на прочность сварных швов (см. табл. 1 и табл. 2), она значительно меньше частоты, соответствующей условию резонанса кристаллизации ($f = 24 \dots 83$ Гц). Таким образом, можно полагать, что именно с частотой управляющего магнитного поля (ПОМП, ПРМП) на формирующиеся кристаллы в хвостовой (и боковой) части ванны воздействует фактор, связанный непосредственно с импульсами индукции знакопеременного, а не постоянного ПОМП или ПРМП.

Можно предположить, что при действии импульсов знакопеременного магнитного поля жидкий металл из головной части ванны перемещается в хвостовую ее часть быстрее, чем это получается из приведенных выше данных. Однако, это предположение необходимо подвергнуть проверке. Кроме того, целесообразно определить значения шагов (Δx) кристаллизации, характерных для процесса автоматической дуговой сварки под флюсом проволокой диаметром 3, 4 и 5 мм на оптимальных для таких процессов режимах сварки.

ВЫВОДЫ

Обзором литературных данных установлено, что имеется большой объем данных о собственной частоте кристаллизации швов при дуговой сварке неплавящимся электродом в аргоне для некоторых металлов и сплавов толщиной 1...3,5 мм. Применительно к автоматической электродуговой сварке под флюсом такие данные весьма малочисленны.

Для установления оптимальных значений частоты управляющих магнитных полей с целью измельчения структуры швов при автоматической дуговой сварке под флюсом, используя концепцию резонанса (совпадения) этой частоты с собственной частотой кристаллизации швов, необходимо последние определить экспериментально.

Высказано предположение о возможности измельчения структурных составляющих металла шва при сварке с воздействием знакопеременных магнитных полей из-за более быстрого перемещения жидкого металла из головной части ванны в хвостовую ее часть, чем это установлено ранее при физическом моделировании процесса с воздействием постоянных магнитных полей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматическая электродуговая сварка / Под. ред. Е. О. Патона. – К. – М. : Машиз, 1953. – 272 с.
2. Макара А. М. О химической неоднородности у зоны сплавления и по слоям кристаллизации и ее связи с диффузией между твердой и жидкой фазами при кристаллизации шва / А. М. Макара, А. А. Россошинский // Автоматическая сварка. – 1956. – № 6. – С. 65–76.
3. Багрянский К. В. Теория сварочных процессов / К. В. Багрянский, З. А. Добротина, К. К. Хренов. – К. : Вища школа, 1976. – 424 с.
4. Теоретические основы сварки / Под. ред. В. В. Фролова. – М. : Высшая школа, 1970. – 592 с.
5. Петров Г. Л. Неоднородность металла сварных соединений / Г. Л. Петров. – Л. : Судпромгиз, 1963. – 208 с.
6. Мовчан Б. А. Исследование химической неоднородности зоны сплавления и слоистой неоднородности в сварных швах / Б. А. Мовчан, Л. А. Позняк // Автоматическая сварка. – 1956. – № 6. – С. 94–96.
7. Петров Г. Л. О механизме образования слоистой неоднородности в сварных швах / Г. Л. Петров // Сварочное производство. – 1981. – № 10. – С. 42–44.
8. Григораи В. В. Управление кристаллизацией металла шва с целью повышения технологической прочности сварных соединений / В. В. Григораи // Диссертация канд. техн. наук. – К. : КПИ, 1991. – 238 с.
9. Морозов В. П. Анализ условий формирования измельченной структуры при кристаллизации металла сварочной ванны с наложением внешних периодических возмущений / В. П. Морозов // Известия вузов. Машиностроение. – 2006. – № 8. – С. 41–54.
10. Морозов В. П. Влияние внешнего пульсирующего источника тепла на кристаллизации с целью эффективного управления структурообразованием / В. П. Морозов // Наука и образование: электронно-техническое издание. – 2010. – Выпуск 10. – С. 1–21.
11. Размышляев А. Д. Исследование прочности стыковых соединений при дуговой сварке с воздействием магнитных полей / А. Д. Размышляев, М. В. Агеева // Вісник ДДМА : зб. нак. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2016. – № 2 (38). – С. 206–212.

Статья поступила в редакцию 11.05.2018 г.