

# TECHNICAL SCIENCES

## СВАРКА ПОД ФЛЮСОМ ПУЛЬСИРУЮЩЕЙ ДУГОЙ

*Головко В.*

*Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины*

## SUBMERGED WELDING WITH PULS ARC

*Holovko V.*

*The Paton Electric welding institute by NAS of Ukraine*

### АННОТАЦИЯ

Исследованы особенности сварка под флюсом пульсирующей дугой (СФПД). Показано, что соответствующий выбор параметров СФПД позволяет изменить распределение потоков в сварочной ванне и характеристики термического цикла сварки. При постоянстве погонной энергии сварки швы, выполненные СФПД, имеют на 20...25 % большую глубину проплавления и соответственно меньшую ширину по сравнению со сваркой без наложения импульсов тока. Импульсный характер подвода тепла позволяет примерно в два раза сократить длительность пребывания металла ЗТВ при температурах свыше 1000 °С и на 30 % сократить продолжительность охлаждения металла в диапазоне 800...500 °С. В результате в сварных соединениях, выполненных СФПД, ширина участка крупного зерна ЗТВ снижается, а площадь зерна аустенита в этом участке сварного соединения уменьшается в 2...3 раза. Применение процесса СФПД при сварке стыковых соединений низколегированных сталей толщиной 16...32 мм позволяет сэкономить до 30 % основного металла, сварочной проволоки, флюса и электроэнергии за счет изменения формы разделки кромок. Показана возможность использования процесса СФПД для сварки низколегированных сталей с пределом прочности до 680 МПа без предварительного подогрева металла.

### ABSTRACT

The features of submerged arc welding with a pulsed arc (SWPA) have been studied. It is shown that an appropriate choice of SWPA parameters makes it possible to change the flows distribution in the weld pool and the thermal cycle characteristics of welding. With a constant heat welding input, the welds made by SWPA have a 20 ... 25% greater penetration depth and, accordingly, a smaller width compared to welding without the imposition of current pulses. The pulsed nature of the heat supply makes it possible to approximately halve the duration of the HAZ metal exposure at temperatures above 1000 °C and reduce the metal cooling duration by 30% in the range of 800...500 °C. As a result, in welded joints made by SWPA, the width of the HAZ coarse grain section decreases, and the austenite grain sizes in this welded joint section decreases by 2...3 times.

The use of the SWPA process in low-alloy steels welding butt joints with a of 16 ... 32 mm plate thickness allows saving up to 30% of the base metal, welding wire, flux and electricity by changing the groove shape. The possibility of using the SWPA process for welding low-alloy steels with a tensile strength of up to 680 MPa without the metal preheating is shown.

**Ключевые слова:** сварка, пульсирующая дуга, сварное соединение, микроструктура, механические свойства.

**Keywords:** welding, pulse arc, weld metal, microstructure, mechanical properties.

### Введение

Изготовление сварных конструкций из высокопрочных сталей связано со значительными трудностями, которые вызваны повышенной склонностью сварных соединений к образованию трещин, снижению физико-механических свойств основного металла в околошовной зоне. Особенно заметно эти трудности проявляются при сварке толстолистового металла, что объясняется отрицательным влиянием термического цикла сварки на возможность обеспечения оптимального сочетания прочности, пластичности и ряда других служебных свойств сварных соединений из-за формирования нежелательных структур в процессе кристаллизации шва, развития в нем химической микронеоднородности и роста неметаллических включений.

При сварке под флюсом конструкций и аппаратов из высокопрочных сталей с толщиной основного металла свыше 10 мм применяют технологии либо односторонней сварки с принудительным формированием обратной стороны шва, либо многосторонней сварки. Обе технологии имеют как свои преимущества, так и недостатки. Если первая из них имеет ограничения по уровню погонной энергии, то вторая характеризуется низкой производительностью, высоким расходом основного и присадочного металлов, флюса, а также повышенными энергозатратами. Соединить в себе основные преимущества и в значительной мере устранить отмеченные недостатки этих двух технологий может сварка под флюсом пульсирующей дугой (СФПД). При этом способе на базовый режим, соответствующий многосторонней технологии, накладыва-

ются мощные импульсы тока и напряжения, параметры которых выбираются исходя из требований однопроходной технологии. Для того чтобы понять на чем основаны подобные предположения и каковы возможности в этом отношении ПДСФ, необходимо составить представление о различиях во влиянии данной технологии по сравнению со сваркой постоянным током на формирование и свойства металла сварного соединения по сравнению со сваркой на постоянном токе стационарной дугой (СПСД).

#### **Методика работы**

Для исследования влияния параметров режима СФПД на структуру и свойства металла шва и ЗТВ сварных соединений была разработана программа эксперимента, которая предусматривала изменение погонной энергии сварки в диапазоне 30...75 кДж/см и частоты наложения импульсов в пределах 0...10 Гц. В соответствии с программой были изготовлены сварные соединения из стали 14ХГНДЦ толщиной 16 и 22 мм с вертикальной разделкой кромок, а также толщиной 32 мм в Х-образной разделкой. Сварку выполняли под флюсом АНК-47 (DIN 32 522: BAV 156 DC 12K) в сочетании с проволокой Св-10Г2 (S3) диаметром 4 мм. Химический состав основного металла и сварочной проволоки приведен в табл.1. Механические свойства основного металла, определенные в соответствии с требованиями ДСТУ ISO 6892-1:2019 [1] и ДСТУ ISO 15792-1:2000 [2], приведены в табл.2. Первый проход в разделку выполняли на флюсовой "подушке" из того же флюса (АНК-47), остальные проходы накладывали после полного охлаждения сварного соединения до комнатной температуры. Для генерации импульсов и синергетического управления процессом сварки использовали специализированное оборудование, разработанное в ИЭС им. Е.О.Патона.

Из сварных соединений вырезались продольные и поперечные образцы для исследования структуры и фазового состава металла в характерных участках ЗТВ. В связи с тем, что размер зерна в участке перегрева и его ширина в большинстве случаев являются ответственными за хрупкое разрушение в ЗТВ сварных соединений, производилась оценка изменения указанных параметров в участке крупного зерна в зависимости от величины погонной энергии и частоты налагаемых импульсов.

Величина зерна (площадь) рассчитывалась как среднее арифметическое значение случайных сечений зерен в плоскости металлографического

шлифа. Металлографические исследования выполняли на поперечных шлифах, вырезанных из средней части стыковых соединений. С целью выявления в швах микрохимической и структурной неоднородности использовали методику травления образцов в омедняющих растворах различной концентрации и растворах пикриновой кислоты с синтолом. Последняя методика использовалась так же для выявления первичной структуры сварных швов. Вторичную структуру швов исследовали после травления полированных образцов в нитале.

Металлографические исследования проводили на поперечных шлифах, вырезанных из средней части сварных соединений. Количественный анализ неметаллических включений шва производили на автоматических вычислительных устройствах для анализа изображений "Omnimet" и "Quantimet-720". Общая загрязненность шва включениями определялась на "Quantimet-720", который был укомплектован для этих целей сканирующей телевизионной камерой с числом строк равным 720, что обеспечивает достаточную разрешающую способность прибора. Распределение включений по размерам и построение графиков производилось при помощи системы исследования изображений "Omnimet" непосредственно со шлифов. По заданной программе на приборе производили подсчет количества включений по размерным группам от минимального (0,5мкм) до максимального размера для каждого образца. Результаты измерений выдавались в табличной форме и в виде графиков зависимости количества неметаллических включений от их размеров. Анализ фазового состава неметаллических включений выполнялся с помощью энергодисперсного спектрометра "Link-860". Анализ составов проводили по точкам с целью устранения влияния фонового излучения.

Для выявления отличий в условиях нагрева и охлаждения металла швов и ЗТВ сварных соединений при использовании технологий сварки стационарной дугой и СФПД производили запись термического цикла в УКЗ ЗТВ.

Стойкость металла швов против хрупкого разрушения и возможность сварки ВПНЛ сталей без подогрева по технологии СФПД исследовали по методике J-BOP test. Сварку выполняли на образцах из высокопрочной стали 12ХН2МДФ под флюсом АНК-57 (DIN 32 522: BFB 155 DC 8 КМНР5) в сочетании с проволокой Св-10ГНМДТА диаметром 4 мм. Характеристики данной стали и сварочной проволоки проведены в табл.1 и 2.

Таблица 1

## Химический состав основного металла и сварочной проволоки

Объект анализа	Массовая доля в металле, %										
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	S	P	O	N	H
Сталь 14ХГНДЦ											
$\delta = 32$ мм	0,132	0,87	0,284	0,96	0,61	0,41	0,011	0,016	0,0049	0,012	0,00005
$\delta = 22$ мм	0,144	0,95	0,256	0,77	0,62	0,43	0,013	0,019	0,0055	0,008	0,00005
$\delta = 16$ мм	0,150	0,77	0,266	0,59	0,55	0,40	0,018	0,021	0,0057	0,008	0,00005
Проволока Св-10Г2											
$\varnothing 4$ мм	0,085	1,60	0,03	0,06	0,05	0,03	0,015	0,012	0,0053	0,007	0,00040
Сталь 12ХН2МДФ											
$\delta = 60$ мм	0,10	0,62	0,262	1,07	2,25	0,56	0,004	0,018	0,0042	0,006	0,00005
Проволока Св-10ГНМДТА											
$\varnothing 5$ мм	0,06	1,43	0,233	0,06	1,21	0,03	0,016	0,016	0,0055	0,007	0,00035

Таблица 2

## Механические свойства основного металла

Толщина основного металла	$R_m$	$R_{p0,2}$	$A_5$	$\alpha$	HV	KCV <sup>-60</sup>
	МПа	МПа	%	град.	МПа	Дж/см <sup>2</sup>
Сталь 14ХГНДЦ						
32 мм	620	490	22	170	320	73
22 мм	605	470	23	180	290	77
16 мм	600	450	24	180	270	80
Сталь 12ХН2МДФ						
60 мм	690	570	23	180	340	117

**Полученные результаты и их обсуждение****Глубина проплавления основного металла**

Для определения влияния режимов СФПД на размеры сварного шва был проведен ряд экспериментов, в ходе которых изменяли ток и напряжение базового режима сварки, амплитуду импульсов тока и напряжения, скважность импульсов и их частоту. Программу исследований составляли с помощью математических методов планирования экспе-

риментов; она включала в себя 158 вариантов сочетаний параметров режимов сварки. Характер изменения напряжения на дуге и сварочного тока во времени показан на рис. 1.

Исследовали влияние мощности дуги при базовом  $q_b$  и импульсном  $q_u$  режимах сварки, погонной энергии сварки  $Q_{св}$  и параметров импульсов на глубину проплавления основного металла  $H$  и ширину сварных швов  $B$ ,

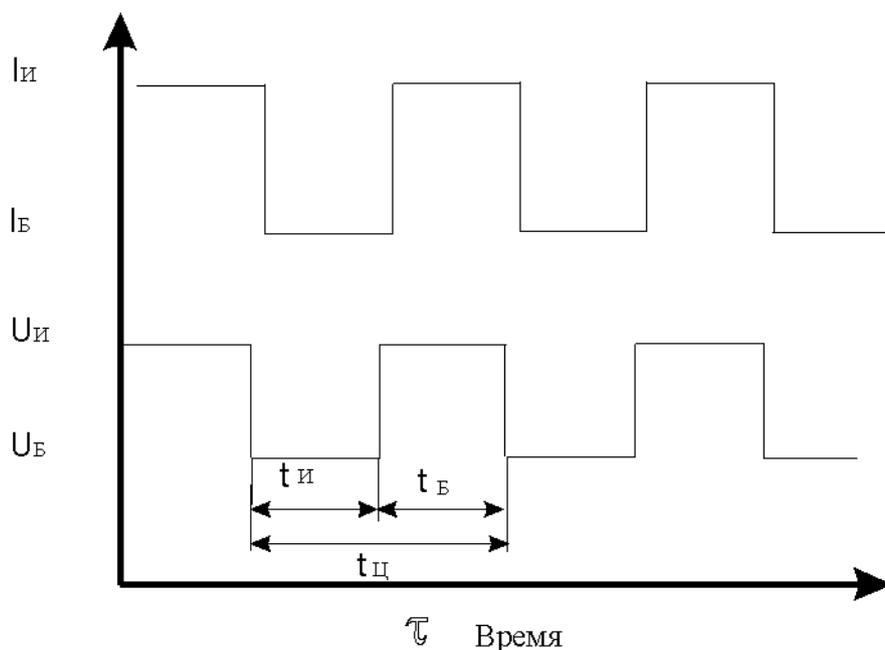


Рис. 1. Схема изменения параметров режима сварки под флюсом пульсирующей дугой

полученных при однопроходной наплавке на пластины низколегированной стали толщиной 16

мм. При этом использовались следующие соотношения:

$$q_{\bar{o}} = I_{\bar{o}} U_{\bar{o}} (1 - c)$$

$$q_u = I_u U_u c$$

$$Q_{cv} = \frac{60(IU)}{v_{cv}} \quad (\text{для случая стационарной дуги})$$

$$Q_{cv} = \frac{60[I_u U_u c + I_{\bar{o}} U_{\bar{o}} (1 - c)]}{v_{cv}} \quad (\text{для случая СФПД}),$$

где  $c = t_u/t_{\bar{u}}$  - скважность импульса;  $v_{cv}$  - скорость сварки.

Частоту собственных колебаний сварочной ванны рассчитывали, используя модель натянутой мембраны. На рис.2 приведены результаты измерения глубины проплавления основного металла ( $H$ ) в сопоставлении с данными по расчету коэффициента ( $K$ ) соответствия частоты налагаемых импульсов ( $f_u$ ) частоте собственных колебаний сварочной ванны ( $f_c$ ), произведенного по формуле:

$$K = f_u / f_c, \text{ где } f_u = 1/t_u$$

Исходя из данных, приведенных выше, можно предположить, что на

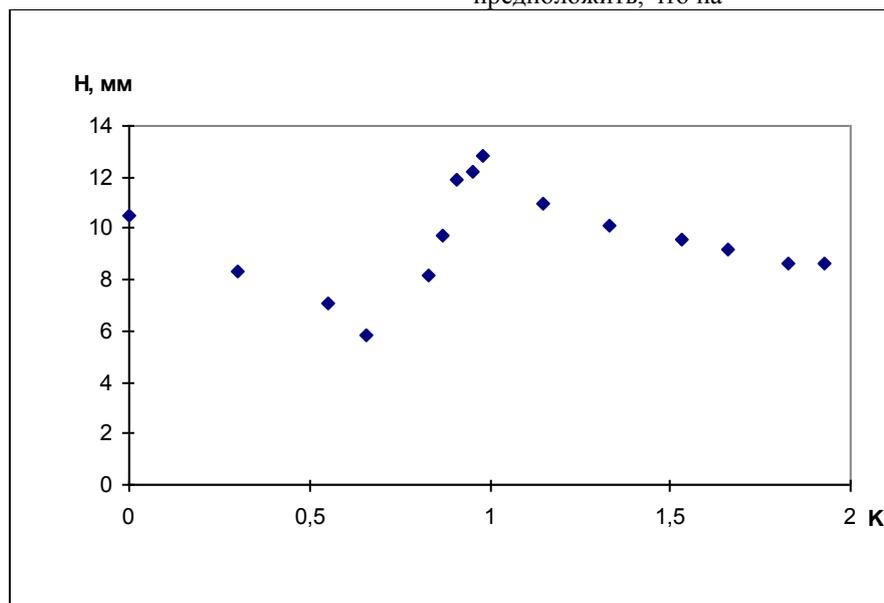


Рис.2. Зависимость между коэффициентом соответствия  $K$  и глубиной проплавления  $H$  основного металла

глубину проплавления основного металла большое влияние оказывает коэффициент  $K$ . На рис. 2 видно, что при значениях  $K$ , близких к единице, глубина проплавления основного металла в 2 раза больше, чем при сварке на режимах, когда  $K=0,5... 0,66$ . Дальнейшее увеличение значений  $K$  до уровня 1,83... 1,93 вызывает некоторое уменьшение глубины проплавления. Это дает основания сделать вывод, что для достижения максимальной глубины проплавления основного металла параметры импульсов при способе СФПД должны быть выбраны таким образом, чтобы значения  $K$  были близки к единице. В иных случаях использование указанной технологии не столь эффективно.

#### Термический цикл сварки

Формирование структуры в УКЗ ЗТВ сварных соединений низколегированных сталей зависит от химического состава основного металла и термического цикла сварки. Для сталей, имеющих эквивалент углерода ( $CE$ ), рассчитанный по формуле МИС, свыше 0,25, рекомендуют выполнять сварку с ограниченной погонной энергией, а для сталей с  $CE > 0,35$ , как правило, используют предварительный подогрев сварных соединений. При этом вели-

чину погонной энергии сварки и температуру предварительного подогрева выбирают таким образом, чтобы обеспечить формирование минимальных по размеру зерен аустенита в области высоких температур и снизить содержание закалочных структур, образующихся в процессе  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения. Если размер аустенитного зерна структуры УКЗ ЗТВ конкретной марки стали зависит от времени пребывания этого участка в области температур свыше 1000 °C ( $\Delta t_{1000}$ ), то содержание высокоуглеродистых составляющих вторичной структуры определяется интенсивностью процессов диффузии углерода и скоростью охлаждения. Многочисленными исследованиями было показано, что одним из важнейших факторов, от которых зависят условия протекания этих процессов, является время пребывания участка крупного зерна зоны термического влияния (УКЗ ЗТВ) в диапазоне температур 800...500 °C ( $t_{8/5}$ ).

В данном разделе работы приведены результаты экспериментального выявления различий термических циклов сварки под флюсом постоянным током обратной полярности дугой (ССД), на которую не накладывали специальных импульсов энер-

гии и процесса СФПД, установление связи этих различий, в случае их наличия, со структурой УКЗ ЗТВ.

В табл.3 приведены результаты подсчета времени пребывания УКЗ ЗТВ сварных соединений

при температуре свыше 1000 °С ( $t_{1000}$ ), времени охлаждения металла от 800 до 500 С ( $t_{8/5}$ ), а также скорости нагрева и охлаждения основного металла при температурах свыше 1000 °С ( $w_{1000}$ ) при различной частоте пульсаций режима сварки.

Таблица 3

Характеристики термического цикла УКЗ ЗТВ

f, Гц	Нагрев			Охлаждение		
	$t_{1000}$ , с	$w_{1000}$ , °С/с	$t_{1000}$ , с	$w_{1000}$ , °С/с	$t_{8/5}$ , с	$w_{8/5}$ , °С/с
0	0,080	5794	9	47,7	55	5,45
0,5	0,112	3244	4	95,5	30	10,0
5,0	0,040	8197	4	99,2	40	7,5
10,0	0,110	4140	8	49,5	57	5,26

Как видно из этой таблицы, наиболее существенное отличие в термических циклах наблюдается для показателя  $t_{1000}$ , т.е. в период около 0,2 с до прохождения источника нагрева и до 9 с после его прохождения. В результате анализа полученных данных были сделаны следующие заключения.

Во-первых, время пребывания основного металла при температуре свыше 1000 °С в период нагрева при СФПД с частотой 5 Гц минимально, а сам нагрев происходит с очень высокой скоростью (свыше 8000 °С/с). При других режимах сварки эта скорость значительно ниже.

Во-вторых, скорость охлаждения при сварке с частотой 0,5 Гц изменяется периодически и период этот совпадает с частотой наложенных на дугу колебаний энергии. При сварке стационарной дугой или СФПД с более высокой частотой пульсации дуги эта периодичность в изменении  $w_{охл}$  практически отсутствует.

В-третьих, охлаждение УКЗ ЗТВ в течение первых 10 с после прохождения источника нагрева при СФПД с частотой пульсаций 0,5 и 5 Гц происходит с более высокими скоростями, по сравнению со сваркой стационарной дугой и СФПД с частотой пульсаций 10 Гц.

Из данных, приведенных в табл.3, видно, что различия в скорости охлаждения для металла УКЗ ЗТВ, полученного при воздействии сварочной дугой с частотой пульсаций 0,5 и 5 Гц, по сравнению со сваркой стационарной дугой и СФПД с частотой пульсаций 10 Гц, сохраняется в диапазоне температур от 800 до 500 °С ( $w_{8/5}$ ). В процентном отношении это различие значительно меньше, чем в диапазоне температур свыше 1000 °С, а при температурах

ниже 500 °С подобное различие вообще не наблюдалось.

Согласно соображениям, изложенным выше, изменение времени пребывания УКЗ ЗТВ при температурах свыше 1000 °С должно повлиять на размер зерен аустенита, а изменение времени охлаждения металла в диапазоне температур от 800 до 500 °С - на диффузию углерода и формирование игольчатых структур. С целью выявления подобных проявлений влияния термического цикла СФПД на структуру УКЗ ЗТВ были выполнены металлографические исследования шлифов.

Микроструктурный анализ показал, что структура УКЗ ЗТВ во всех исследованных образцах состоит из одинаковых составляющих, однако, их количественное соотношение и морфология при этом различны и зависят от частоты пульсации сварочной дуги. Вторичная структура представляла собой пограничный (полигональный) феррит, выпавший в виде межзеренных прерывистых прослоек переменной толщины. Во внутренних объемах зерен был обнаружен пластинчатый феррит со второй фазой в виде пакетов с низкоугловыми границами и мелкодисперсными выделениями карбидов, а также видманштеттовый феррит. К последней форме феррита нами были отнесены лишь пластинчатые формирования, растущие вглубь зерна непосредственно от полигонального феррита, расположенного по границам зерен, а также четко выраженные групповые выделения внутри зерен, не содержащие внутри пластин каких-либо выделений при наблюдении структуры в оптическом микроскопе.

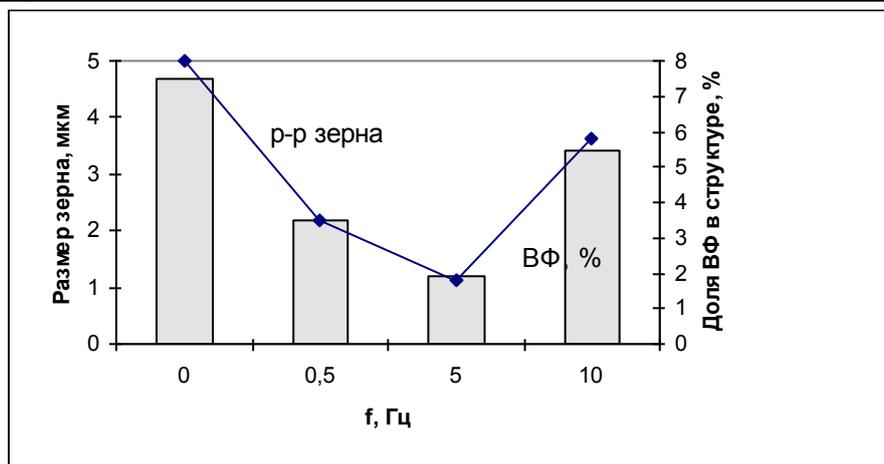


Рис. 3 Влияние частоты пульсации сварочной дуги на характеристики структуры металла швов

В качестве величины, характеризующей размер зерен первичного аустенита, определяли площадь зерен этой структурной составляющей. Так как основным представителем игольчатых составляющих во вторичной структуре УКЗ ЗТВ был видманштеттовский феррит (ВФ), то оценку влияния  $t_{8/5}$  на структуру перегретого металла проводили по содержанию именно этой составляющей.

Как видно из приведенных в табл.3 данных, минимальное время пребывания металла ЗТВ при температуре свыше  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  было зафиксировано при СФПД с частотой наложения импульсов 0,5 и 5 Гц.

Структура УКЗ ЗТВ этих сварных соединений характеризуется минимальной площадью зерен первичного аустенита, что соответствует высказанным ранее предположениям. Следует обратить внимание на то, что размеры зерен аустенита при сварке на этих двух режимах так же отличались и между собой. При равенстве  $t_{1000}$  на ветви охлаждения такое различие на наш взгляд может быть объяснено различием  $t_{1000}$  на ветви нагрева. Очевидно, что времени 0,04 с недостаточно для заметного роста зерен аустенита, а при  $t_{1000}$  равном 0,112 с этот процесс получает определенное развитие. Сокращение времени  $t_{1000}$  на ветви нагрева для режима СФПД с частотой 5 Гц примерно в два раза по сравнению с другими режимами сварки является характерной особенностью импульсного режима. В этом случае дуга горит на протяжении 0,1 с с более высокой энергией и на протяжении последующих 0,1 с с более низкой. Более высокого уровня энергии хватает на то, чтобы расплавить дополнительную (по сравнению с предыдущим полупериодом) порцию присадочного и основного металла, но не достаточно для перегрева расплавленного металла, поэтому металл ЗТВ с некоторой задержкой достигает температуры свыше  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ , более быстро охлаждается до этой же температуры после перегрева и быстрее проходит участок охлаждения от  $800$  до  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

При СФПД с частотой 0,5 Гц горение дуги в каждом полупериоде является более длительным (около 1 с) и этого времени достаточно для интенсивного перегрева плавящегося металла, что подтверждается близким уровнем значений показателя  $t_{1000}$  для ветви нагрева данного режима и сварки стационарной дугой. Охлаждение УКЗ ЗТВ в этом случае происходит более интенсивно, т.к. наличие в режиме сварки периодов горения дуги с более низкой энергией способствует снижению теплопередачи от дуги к расплавленному металлу и дальше в основной металл. Данное предположение подтверждается тем, что для этого режима СФПД характерны минимальное  $t_{1000}$  и  $t_{8/5}$  на ветви охлаждения.

Характерные точки термического цикла режима СФПД с частотой 10 Гц совпадают с данными для термического цикла сварки стационарной дугой. Из этого можно сделать вывод, что для данного режима сварки частоту 10 Гц не целесообразно использовать, т.к. она не позволяет реализовать одно из основных преимуществ СФПД, а именно - сокращение времени пребывания металла ЗТВ при высоких температурах.

#### **Структура ЗТВ сварного соединения**

Сравнительный анализ результатов структурных исследований показал, что характер их изменения в зависимости от величины погонной энергии сварки различается. Так при ССД увеличение погонной энергии примерно в два раза сопровождается укрупнением зерен в УКЗ ЗТВ примерно в четыре раза (рис.4).

При использовании технологии СФПД укрупнение зерен примерно в 2,5...3 раза меньше. Что касается самого участка крупного зерна, то зависимость здесь более сложная и определяется не только величиной погонной энергии, но и частотой пульсации режима сварки (рис.5). Повышение частоты налагаемых импульсов во всем исследованном диапазоне погонных энергий уменьшает ширину участка примерно в 2...3 раза.

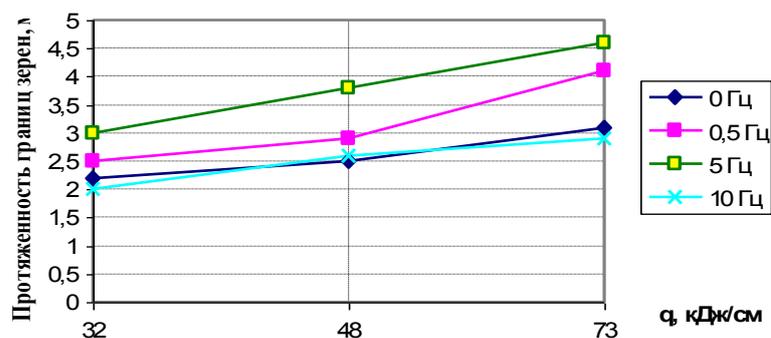


Рис.4. Влияние частоты пульсации сварочной дуги и погонной энергии сварки на протяженность границ зерен в УКЗ ЗТВ

Влияние частоты импульсов на ширину участка крупного зерна становится заметным уже при пульсации режима сварки с частотой 0,5 Гц, однако максимальный эффект сужения участка перегрева достигается при частоте 5 Гц. При дальнейшем повышении частоты импульсов эффективность ее воздействия на сужение зоны крупного зерна ослабляется.

Структурные изменения металла ЗТВ в твердом состоянии описываются обычно с помощью диаграмм превращения при непрерывном охлажде-

нии, на которых отражается вся последовательность распада аустенита при его охлаждении. Отсутствие таких диаграмм для процессов сварки пульсирующей дугой не позволяет судить о тех кинетических условиях и температурных интервалах, при которых происходит превращение аустенита. В связи с этим кинетика распада аустенита оценивалась нами путем анализа конечных структур, их количественного соотношения, морфологии и топографии расположения.

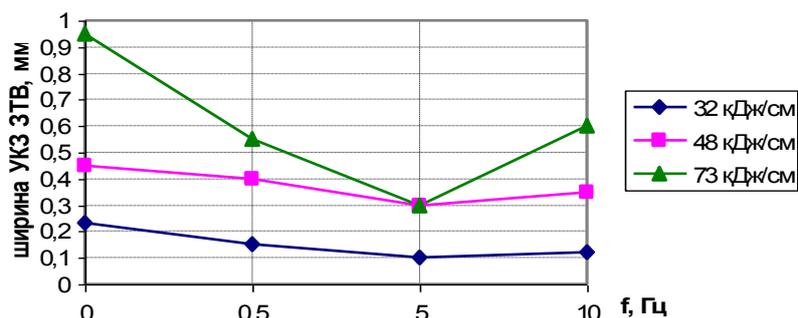


Рис.5. Влияние частоты пульсации сварочной дуги на ширину УКЗ ЗТВ при различных уровнях погонной энергии сварки

Микроструктурный анализ металла ЗТВ показал, что в участке перегрева сварных соединений стали 14ХГНДЦ, выполненных как сваркой стационарной дугой, так и СФПД, формируются практически одинаковые виды структурных составляющих, однако их количественное соотношение и морфология в значительной степени от погонной энергии, частоты импульсов и размера зерен аустенита. В целом в участке перегрева обнаружено несколько морфологических форм феррита: феррит, выпавший по границам в виде межзеренных прерывистых прослоек переменной толщины (пограничный, полигональный, зернограничный, алотрион-

морфный, доэвтектоидный), а также внутризеренный, который часто называют тоже полигональным.

Проведенными исследованиями установлено, что содержание полигонального феррита (ПФ) в участке крупного зерна ЗТВ при СФПД определяется величиной погонной энергии, частотой пульсаций режима сварки и размером зерна. Во всех случаях, независимо от величины погонной энергии, с увеличением частоты пульсаций режима наблюдается общая тенденция к увеличению его содержания, а максимальное его количество обнаружено в ЗТВ сварных соединений, выполненных на частоте 5 Гц (Рис.6

).

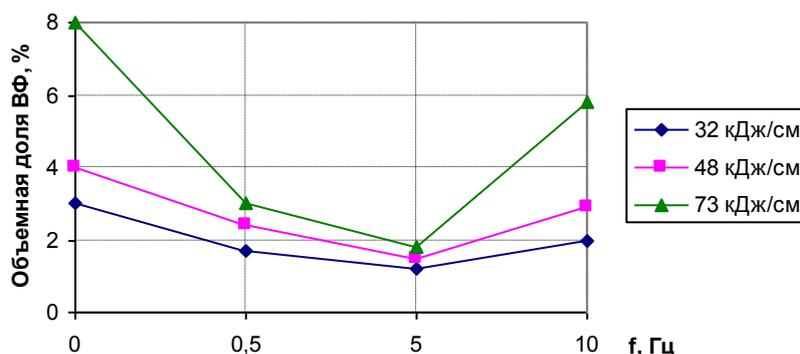


Рис. 6. Влияние частоты пульсации сварочной дуги на содержание полигонального феррита (ПФ) в УКЗ ЗТВ при различных уровнях погонной энергии сварки

Микроструктурный анализ показал, что в металле ЗТВ соединений, выполненных сваркой стационарной и пульсирующей дугой, наряду с ПФ присутствует и другая его модификация - видманшеттовый феррит (ВФ), который характеризуется крупноигльчатой ориентированной микроструктурой.

Известно, что ВФ возникает, если температура нагрева стали была выше 1100...1150 °С. Чтобы оценить влияние режима сварки на образование ВФ были проведены количественные расчеты площади зерен в участке перегрева ЗТВ, оценена доля пло-

щади, занимаемой ВФ и характер изменения ее в зависимости от величины погонной энергии и частоты. На рис. 7 приведены результаты измерений средней площади, занимаемой ВФ, в зависимости от частоты пульсации режима сварки.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что величина зерен, формирующихся в участке перегрева, является важным фактором, который необходимо учитывать при прогнозировании структуры металла ЗТВ сварных соединений. Таким образом, роль размера зерен, выросших под

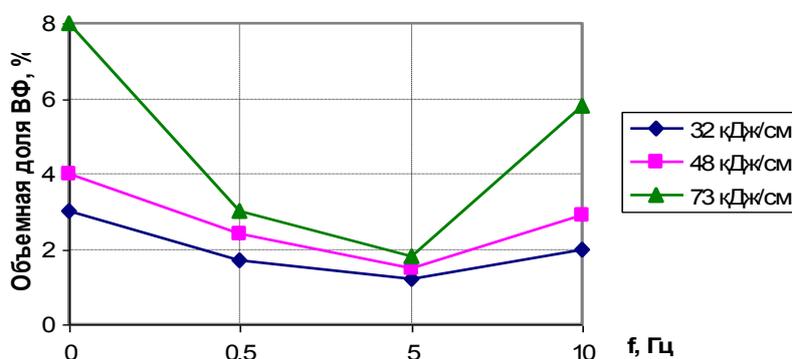


Рис. 7. Влияние частоты пульсации сварочной дуги и погонной энергии сварки на содержание видманшеттового феррита (ВФ) в структуре УКЗ ЗТВ

воздействием тепла сварочной дуги, в части влияния на формирование ВФ идентична их роли при печной термообработке. Поэтому, для минимизации содержания ВФ в участке крупного зерна наиболее приемлемыми режимами СФПД (погонная энергия, частота пульсаций) являются те из них, которые снижают склонность металла к росту зерен в участке перегрева.

В исследованном диапазоне режимов сварки оптимальными являются те режимы, при которых в ЗТВ сварного соединения формируются зерна с размерами в пределах  $(50...100)10^{-4}$  мм<sup>2</sup> и ниже. При таких значениях величины зерен количество образующегося ВФ минимально.

Следует отметить, что определение точных температурных границ между рассмотренными степенями превращений в металле ЗТВ затруднено не только ввиду сложности методики, но и потому, что в условиях непрерывного охлаждения происходит наложение одного вида превращения на другой, а большинство физических методов фиксируют лишь области максимального развития того или иного превращения. Описанная выше, на основе изучения микроструктур и анализа термических циклов сварки, кинетика превращения аустенита в ЗТВ низколегированных сталей схематически изображена на рис. 7.

Следует отметить, что при многослойной или двусторонней СФПД в участке крупного зерна,

подвергшемся повторному нагреву, размер зерен в участке перегрева примерно в 1,5...2 раза меньше, чем в аналогичном участке после однократного нагрева. С увеличением погонной энергии размер зерен несколько укрупняется, однако максимальные их размеры не превышают граничных, приведенных на рис.4.

Характерной особенностью структуры в этом участке является почти полное отсутствие по границам зерен сплошных выделений ПФ, а в ферритной матрице - ВФ. Структура матрицы состоит из смеси феррита со второй фазой, количественное соотношение которых изменяется в зависимости от величины погонной энергии.

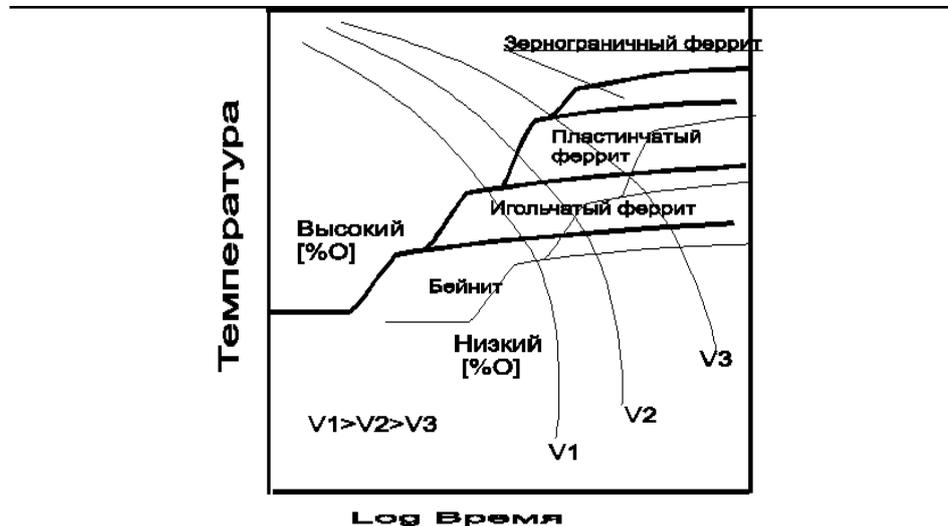


Рис.8. Схематическая диаграмма превращения аустенита при непрерывном охлаждении в металле ЗТВ при СФПД ( $V_1=32$  кДж/см,  $V_2=48$  кДж/см,  $V_3=73$  кДж/см)

#### Механические свойства металла сварных соединений

Изменения в структуре металла швов и ЗТВ сварных соединений, вызванные импульсным характером горения сварочной дуги и описанные в данной работе, несомненно должны оказать влияние на служебные свойства сварных соединений, особенно на их стойкость образования холодных трещин. С целью повышения этого показателя изготовители сварных конструкций вынуждены прибегать к таким дорогостоящим и трудоемким операциям как предварительный и сопутствующий подогрев изделий, контроль скорости охлаждения сварных соединений в послесварочный период.

Влияние СФПД на склонность металла швов к образованию холодных трещин оценивали при сварке стали марки 12ХН2МДФ толщиной 60 мм электродной проволокой Св – 10ГНМДТА под высокоосновным агломерированным флюсом АНК – 57. Технология сварки сталей этого класса предусматривает использование предварительного подогрева при температуре 120 °С.

Испытания проводили по методике G – ВОР, результаты испытаний приведены на рис 8 и 9.

Как видно из этих данных, сварка по технологии СФПД позволяет снизить температуру предварительного подогрева до 30 °С при погонной энергии сварки 32 кДж/см. Подобное снижение температуры подогрева крупногабаритных свариваемых конструкций позволяет получить значительную экономию энергоносителей и улучшить условия работы сварщиков.

Как видно из приведенных данных, технология СФПД позволяет повысить стойкость сварных соединений высокопрочных низколегированных сталей против образования холодных трещин. При сварке с погонной энергией 32...47 кДж/см возможно осуществление процесса без применения предварительного подогрева. При сварке с погонной энергией 73 кДж/см необходимо осуществлять предварительный подогрев изделия, но и в этом случае технология СФПД позволяет снизить температуру подогрева, что способствует снижению энергозатрат и трудозатрат на изготовление сварных конструкций.

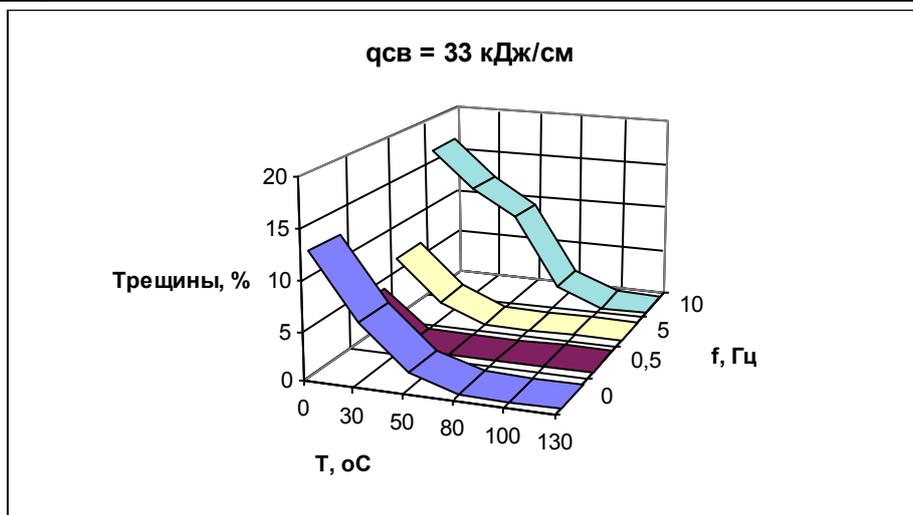


Рис.8. Влияние частоты пульсации сварочной дуги на стойкость против образования трещин в металле сварных швов ВПНЛ сталей

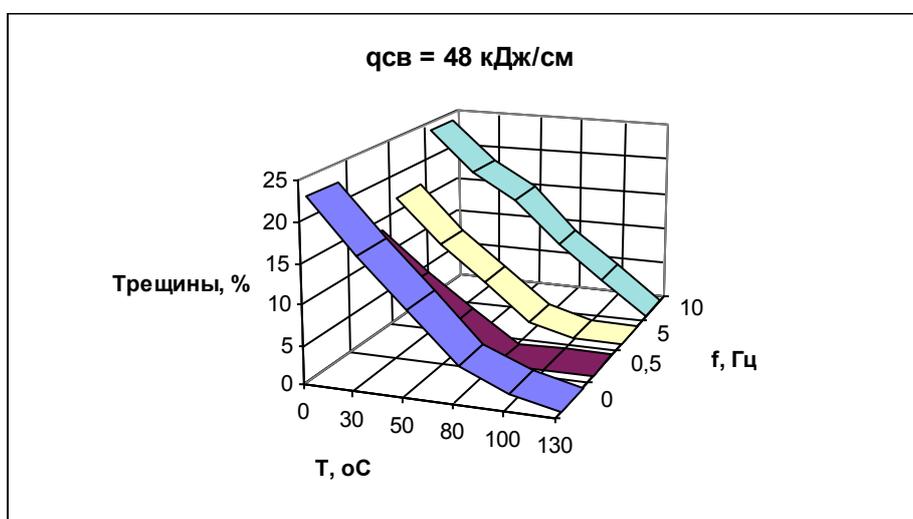


Рис.9. Влияние частоты пульсации сварочной дуги на стойкость против образования трещин в металле сварных швов ВПНЛ сталей

### **Выводы**

Сварка под флюсом пульсирующей дугой позволяет оказывать дополнительное, по сравнению со сваркой стационарной дугой, влияние на физико-химические процессы в сварочной ванне. Соответствующий выбор параметров СФПД позволяет изменить распределение потоков в сварочной ванне и характеристики термического цикла сварки. При постоянстве погонной энергии сварки швы, выполненные СФПД, имеют на 20...25 % большую глубину проплавления и соответственно меньшую ширину по сравнению со ССД.

Импульсный характер подвода тепла позволяет примерно в два раза сократить длительность пребывания металла ЗТВ при температурах свыше 1000 °С и на 30 % сократить продолжительность охлаждения металла в диапазоне 800...500 °С. В результате в сварных соединениях, выполненных СФПД, ширина УКЗ ЗТВ снижается, а площадь зерна аустенита в этом участке сварного соединения уменьшается в 2...3 раза.

При дуговой сварке под флюсом процесс кристаллизации металла сварочной ванны происходит скачкообразно, СФПД способствует снижению

примерно в три раза объема расплава, кристаллизующегося за один "скачок" и повышению за счет этого скорости кристаллизации каждой отдельной порции. Периодичность процесса кристаллизации определяется параметрами импульсов и условиями отвода тепла из ванны в основной металл.

Особенности термического цикла сварки при СФПД по сравнению со сваркой на постоянном токе обуславливают подавление процесса образования пластинчатого феррита во вторичной структуре металла швов, снижение содержания перлита, формирование полигонального феррита в более дисперсной "блочной" форме. Можно полагать, что отмеченные особенности формирования структур являются причиной изменения служебных свойств металла швов.

Применение процесса СФПД при сварке стыковых соединений низколегированных сталей толщиной 16...32 мм позволяет сэкономить за счет изменения формы разделки кромок до 30 % основного металла, сварочной проволоки, флюса и электроэнергии. Показана возможность использо-

вання процесу СФПД для сварки низколегованих сталей з пределом прочності до 680 МПа без попереднього підігріву металу.

На основі виконаного комплексу досліджень можна зробити висновок, що СФПД є новим прогресивним варіантом технології сварки під флюсом, що відрізняється високою економічністю при збереженні рівня продуктивності та надійності, характерного для цього процесу в цілому.

## АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛІВ

**Повищенко О.А.**

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», аспірант кафедри ІВТ*

**Баженов В.Г.**

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», к.т.н., доцент кафедри АСНК*

## ANALYSIS OF MODERN METHODS OF MEASURING ELECTRIC FIELDS

**Povschenko O.**

*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", PhD student*

**Bazhenov V.**

*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", c.t.s.*

### АННОТАЦІЯ

У статті наведено короткий огляд та аналіз основних методів вимірювання напруженості електричних та електростатичних полів. Розглянуто цифровий метод та розроблено на його базі апаратури для вимірювання та бездротової передачі інформації з метою подальшої обробки, реєстрації, візуалізації та документування на комп'ютері.

### ABSTRACT

The article provides a brief overview and analysis of the main methods of measuring the intensity of electric and electrostatic fields. The digital method and the equipment developed on its basis for measurement and wireless transmission of information for the purpose of further processing, registration, visualization and documentation on a computer are considered.

**Ключові слова:** напруженість електричного поля, електростатичні поля, динамічний метод вимірювання електричної напруженості поля.

**Keywords:** strength of the electric field, electrostatic field, dynamic method of measuring electric field strength.

Завдання вимірювання напруженості електричних полів виникає в різних галузях промисловості, пов'язаних з виробництвом або з широким використанням синтетичних матеріалів, де може накопичуватися статична електрика і може призвести до серйозних наслідків. Це стало особливо актуальним із бурхливим розвитком технологій морських нафтоперевезень (виробництво великотоннажних танкерів), де накопичення статичної електрики, при транспортуванні нафти, призводило до екологічних катастроф.

Зростання енергетичної промисловості вимагало побудови ліній електропередач (ЛЕП) рівні передачі напруг, на яких вже перевищують 1000 кВ. Це своєю чергою потребувало вивчення питань впливу низькочастотних полів як на людину, так і на навко-

лишнє середовище, що створюється як самими енергетичними установками так і ЛЕП. Вирішення цих питань також неможливе без засобів вимірювання напруженості електричних полів низької частоти. Перераховані завдання в основному пов'язані з вимірюваннями дуже високих значень електричної напруженості або з вимірюваннями електричних полів змінної промислової частоти. Тому для вирішення цих завдань використовуються специфічні методи та апаратура.

Питаннями вимірювання електростатичних полів в атмосфері цікавляться вчені з давніх-давен. Використовуючи механічні електроскопи, такими вимірами займалися ще М.В.Ломоносов та Г.В.Ріхман у середині 18 століття. При вимірюванні напруженості електростатичних полів в атмосфері було встановлено, що значення цієї напруженості