

УДК 621.79

Лебедев В.А., докт. техн. наук, профессор  
Новиков С. В.

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, г. Киев, valpaton@ukr.net

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕЛИЧИН ТВЁРДОСТИ НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА И МЕТАЛЛА ЗТВ ПРИ НИЗКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЯХ СВАРОЧНОЙ ВАННЫ**

Одним из способов повышения технологической прочности сварных конструкций является управление кристаллизацией сварочной ванны посредством наложения на расплав сварочной ванны или сварочный инструмент периодического механического воздействия, что способствует формированию мелкозернистой структуры металла сварного шва и направленного роста кристаллов, обуславливающих получение высоких механических свойств [1-3].

Большинство исследований данной тематики касается частотного диапазона превышающего 10 Гц, однако, характерные изменения микроструктуры наблюдаются уже при частоте 2,5 Гц [3].

Целью данных исследований является изучение влияния амплитудно – частотных характеристик низкочастотных механических колебаний сварочной ванны на значение твёрдости наплавленного металла и ЗТВ как интегрального критерия прочности [4].

Обработка экспериментальных результатов производилась методом регрессионного анализа, что подразумевает построение полиномов с эмпирически определёнными коэффициентами. Это было осуществлено при помощи программного пакета STATISTICA.

Эксперименты, на основе которых были получены регрессионные модели, проводились на технологических режимах наплавки и амплитудно – частотных характеристиках колебания сварочной ванны, разработанных в соответствии с методикой планирования эксперимента по методу «латинского квадрата» [5]. Функцией отклика является величина твёрдости наплавленного металла и ЗТВ, а независимыми факторами - сила тока дуги  $I_n$ , скорость наплавки  $V_n$ , амплитуда  $A$  и частота внешних колебаний  $\nu$ . Выражения для твёрдости  $B$  наплавленного металла и  $B_{ЗТВ}$  [Па] имеют вид:

$$\begin{aligned}
 B = & 0,0025115325976854 + 11490,9078052973 \cdot A \cdot V_n^2 - 1,4548155487319 \cdot I_n \cdot A^2 + \\
 & + 0,082027586432854 \cdot V_n \cdot \nu^2 + 0,501025022483833 \cdot I_n \cdot V_n^2 + 0,0000416672416763302 \cdot A \cdot I_n^2 - \\
 & - 0,00000642951116417346 \cdot V_n \cdot I_n^2 - 44,3442907498056 \cdot A \cdot \nu \cdot V_n + 0,00105829634213171 \cdot A \cdot \nu \cdot I_n - \\
 & - 0,00241590 \cdot I_n \cdot \nu \cdot V_n + 16,6016450907408 \cdot A \cdot V_n - 0,000000227768144422142 \cdot I_n^2 - \\
 & - 106,349123766147 \cdot V_n^2 - 0,000335306391843706 \cdot \nu^2 + 41,8181782549147 \cdot A^2 + \\
 & 7752,10268876331 \cdot A^3 + 0,0058759267308144 \cdot I_n \cdot V_n + 0,0000103364256894232 \cdot I_n \cdot \nu
 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned}
 B_{ЗТВ} = & 1,384384 \cdot 10^9 - 1,394832 \cdot 10^{12} \cdot I_n \cdot A^2 + 1,607340 \cdot V_n \cdot \nu^2 - \\
 & - 1,310467 \cdot 10^{11} \cdot A \cdot \nu^2 + 5,471284 \cdot 10^{11} \cdot I_n \cdot V_n^2 + 4,611754 \cdot 10^7 \cdot A \cdot I_n^2 - \\
 & - 2,478328 \cdot 10^7 \cdot V_n \cdot I_n^2 + 2,139833 \cdot 10^9 \cdot A \cdot \nu \cdot I_n - 1,789068 \cdot 10^{11} \cdot A \cdot I_n \cdot V_n - \\
 & - 3,220541 \cdot 10^9 \cdot I_n \cdot \nu \cdot V_n - 7,239987 \cdot 10^{11} \cdot \nu \cdot V_n + 5,285688 \cdot 10^{11} \cdot A \cdot \nu + \\
 & + 4,762790 \cdot 10^6 \cdot I_n \cdot \nu + 1,489510 \cdot 10^{10} \cdot I_n \cdot V_n - 5,900029 \cdot 10^9 \cdot I_n \cdot A - \\
 & - 1,567035 \cdot 10^5 \cdot I_n^2 + 8,676576 \cdot 10^{15} \cdot A^3
 \end{aligned} \quad (2)$$

Данные уравнения имеют коэффициенты детерминации 85 и 88 соответственно.

Применяя данные регрессионные модели (1), (2), было установлено, что максимальное значение твердости металла валика на режиме  $I_n = 125$  А,  $V_n = 0,0039$  м/с,  $A = 0,007$ , м  $\nu =$

3 Гц, превышает на 31,7 % твёрдость металла сварного шва и на 25,3 % твёрдость металла ЗТВ, полученных наплавкой без колебаний.

Экспериментальная часть исследований представляет собой механизированную наплавку плавящимся электродом в среде углекислого газа на установке, схема которой приведена на рисунке 1. В качестве плавящегося электрода применялась стальная омеднённая проволока типа СВ 08 Г2С диаметром 1,2 мм, подаваемая посредством полуавтомата сварочного 1 через горелку непосредственно в зону горения дуги. Ток наплавки регулируется посредством скорости подачи электродной проволоки. Скорость подачи проволоки осуществляется как плавно, так и дискретно через соответствующие тумблеры на панели полуавтомата.

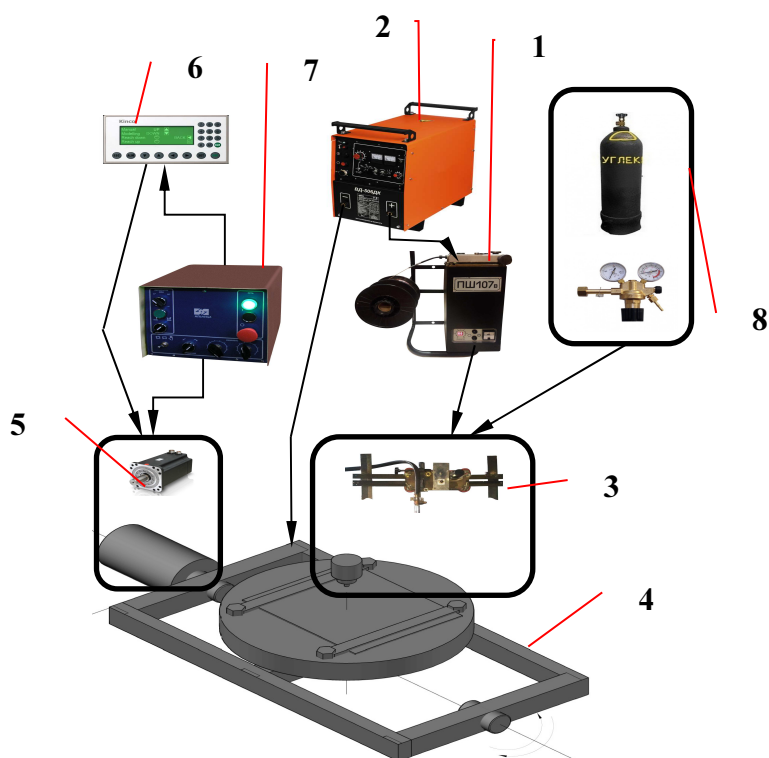


Рис. 1 – Схема установки для наплавки в среде углекислого газа с колебаниями сварочной ванны

Величина тока наплавки определялась амперметром, расположенным на лицевой части источника питания 2. Источник питания является выпрямителем для ручной и автоматической сварки, обеспечивающий максимальный ток до 400 А. Механическое прямолинейное перемещение сварочной горелки осуществляется посредством подвижной станины с тумблером 3 плавной регулировки скорости перемещения. Свариваемая заготовка закрепляется на подвижном столе 4, который перемещается по дуге окружности в направлении перпендикулярном направлению наплавки. Колебания стола генерируются посредством шагового двигателя 5. Амплитуда и частота колебаний задаются непосредственно через пульт управления двигателем 6. Максимальная частота, при которой двигатель работает в стабильном режиме, составляет 4,5 Гц. Амплитуда, при которой возможно устойчивое формирование наплавленного валика, не превышает 7 мм. Стол приводился в колебательное состояние после 5 – 7 сек. от момента начала горения дуги посредством блока управления 7. Подача и регулировка углекислого газа подаётся из газового баллона 8 посредством редуктора. В качестве заготовки для наплавки были использованы прямоугольные пластины из низкоуглеродистой стали типа Ст3. Углекислый газ, используемый в экспериментах, представлял собой технический углекислый газ – 99,5 % CO<sub>2</sub>. Расход газа лежал в пределах 9-12 л/мин.

#### Список ссылок

1. Che-wei Kuo, Sheng-Min Yang, Jie-Hao Chen, Gen-Huey Lai, Yu-Che Chen, Yung-Tse Chang, Weite Wu. Preferred Orientation of Inconel 690 after Vibration Arc Oscillation Welding. Materials Transactions, Vol. 49, (2008) Issue 3, pp. 688 – 690. DOI:10.2320/matertransmep2007305

2. M. J. Jose, S. S. Kumar, A. Sharma. Vibration assisted welding processes and their influence on quality of welds. Science and Technology of Welding & Joining. Volume 21, 2016 - Issue 4. DOI: 10.1179/1362171815y.0000000088

3. Agni Arumugam Selvi. Effect of linear direction oscillation on grain refinement. Thesis. 2014, Master of Science, Ohio State University, Mechanical Engineering, 45 p.
4. Шевельков В.В. Твёрдость – критерий упрочнения металлических материалов / В.В.Шевельков // Вестник ПсковГУ. Серия «Экономические и технические науки». – 2014. – №5 – С. 125 – 134.
5. Протодяконов М. М. Методика рационального планирования эксперимента. / М.М.Протодяконов, Р. И. Тедер. – Москва, «Наука», 1970, – 76 с.

УДК 621.79:669.15

**Берднікова О.М., канд. техн. наук, старший наук. співробітник**  
**Алексєнко Т.О. канд. техн. наук**  
**Половецький Є.В., канд. техн. наук., старший наук. співробітник**  
 Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона, [poloveckiy@gmail.com](mailto:poloveckiy@gmail.com)  
**Гурнік О.О., викладач**  
 Фаховий коледж інженерії та зв'язку Національного авіаційного університету,  
[olga.gurnick@gmail.com](mailto:olga.gurnick@gmail.com)

### СТРУКТУРА ТА ХАРАКТЕР РУЙНУВАННЯ ЛЕГОВАНОЇ СТАЛІ З ВМІСТОМ ВУГЛЕЦЮ 0,31%

При виготовленні відповідальних зварних вузлів і корпусів колісної броньової техніки спеціального призначення використовують леговані термозміцненні високоміцні сталі. Основними проблемами при їх зварюванні є забезпечення достатнього рівня міцності при забезпеченні тріщиностійкості [1-3].

Дослідження проводили на модельних зразках середньовуглецевої легованої сталі (0,31%С; 93,3% Fe; 1,16% Si; 0,74% Mn; 1,16% Cr; 2,26% Ni; 0,2% V; 0,04% Al; 0,024% Ti; 0,01% S; 0,016% P), що отримані за термічними циклами зварювання (ТЦЗ) в інтервалі температур 600-500°C з різними швидкостями охолодження ( $W_{6/5}=3,8$  °C/c, 12,5 °C/c та 21 °C/c) з використанням комплексу методів досліджень: світлової металографії (Versamet-2, Neophot-32) та аналітичної растрової мікроскопії (СЭМ-515, фірми «PHILIPS», Нідерланди).

Металографічними дослідженнями встановлено, що при збільшенні швидкості охолодження до  $W_{6/5}=21$ °C/c в металі ЗТВ формується переважно мартенситна структура (95...98%), розмір пакетів зменшується в 2 рази (від 35...80 мкм до 15...50 мкм), а мікротвердість збільшується в середньому на 13 % (від 4420...5600 МПа до 4800...6810 МПа).

Для оцінки в'язкості руйнування ( $K_{1C}$ ) та тріщиностійкості металу зразків броньової сталі проводили фрактографічні дослідження впливу структурних факторів на характер тріщиноутворення в умовах випробувань при зовнішньому навантаженні вигином. Механічними випробуваннями показано, що найбільший показник в'язкості руйнування  $K_{1C} = 110$  МПа $\times$ м<sup>1/2</sup> металу отримано при швидкості охолодження  $W_{6/5} = 3,8$  °C/c, табл.1. При збільшенні швидкості охолодження до  $W_{6/5}=12,5$  °C/c та  $W_{6/5}=21$  °C/c значення  $K_{1C}$  знижується, що пов'язано зі зменшенням кількості нижнього бейніту (до ~ 2...5%) та збільшенням кількості мартенситної складової.

Таблиця 1. Результати механічних випробувань на вигин броньової сталі 71 після імітації ТЦЗ при різних швидкостях охолодження ( $W_{6/5}$ )

	Швидкість охолодження ( $W_{6/5}$ )		
	$W_{6/5}=3,8$ °C/c	$W_{6/5}=12,5$ °C/c	$W_{6/5}=21$ °C/c
$K_{1C}$ , МПа $\times$ м <sup>1/2</sup>	110	85	70