

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЁРДОСТИ НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА И МЕТАЛЛА ЗОНЫ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ (ЗТВ) ПРИ НИЗКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЯХ СВАРОЧНОЙ ВАННЫ

**Актуальность работы.** Использование механических гармонических колебаний сварочной ванны или инструмента является недорогим и достаточно простым средством формирования желаемой степени дисперсности структуры, а значит прочности наплавленного металла. Возможность по-разному прикладывать колебания относительно оси наплавки (сварки) позволяет формировать сварочный шов или наплавливаемый валик с определенной анизотропией механических свойств в заданном направлении.

Исследованию формирования микроструктуры в условиях периодического воздействия на расплав посвящено большое количество работ. Однако, исследования касаются в основном изучения влияния с частотами, значительно превосходящими 5 Гц и амплитудами от нескольких микрон до 2–3 мм.

Исследуется возможность колебаниями расплава сварочной ванны с частотным 2,5–4,5 Гц и амплитудным диапазоном 3–7 мм влиять на значение твёрдости наплавленного металла и металла зоны термического влияния (ЗТВ).

**Цель работы** – получение количественных зависимостей, определяющих величину твёрдости наплавленного металла и ЗТВ как функцию от параметров технологического и колебательного режимов.

**Методы исследования.** Для исследований образцы были подготовлены и отполированы до 14 степени чистоты по ГОСТ 25593–83. Наплавка производилась легированной проволокой в среде углекислого газа на подложку из углеродистой стали. Твёрдость по Виккерсу определялась с помощью твердомера LECO M–400 с нагрузкой индентера 1 кг согласно ДСТУ ISO 6507–1:2007. Результаты измерений обрабатывались методом регрессионного анализа при помощи программных пакетов STATISTICA 12 и PTC Mathcad Prime 3.1.

**Результаты.** Получены регрессионные модели зависимости величины твёрдости наплавленного металла и металла ЗТВ от силы тока и скорости наплавки, амплитуды и частоты гармонических колебаний сварочной ванны. По полученным моделям построены контурные графики зависимости величины твёрдости от амплитудно-частотных характеристик колебаний. Приведен вариант прогноза получения максимальной твёрдости наплавленного металла и металла ЗТВ при токе наплавки 125 А и скорости наплавки 14 м/ч.

**Научная новизна.** Проведены эксперименты по наплавке образцов при различных колебательных режимах сварочной ванны, что осуществлялось посредством применения программируемого шагового двигателя.

Построены эмпирические зависимости влияния величин тока и скорости наплавки, частоты и амплитуды колебаний определённого диапазона на величину твёрдости наплавленного металла и ЗТВ.

**Практическая ценность.** Доказана возможность повышения твёрдости наплавленного металла и ЗТВ за счёт применения колебаний сварочной ванны данного амплитудно-частотного диапазона. Определены значения амплитуды и частоты колебаний при оптимальных значениях силы тока и скорости наплавки, позволяющие получить максимальное значение твёрдости.

**Ключевые слова:** наплавка, колебания, твёрдость, ЗТВ, регрессионная модель, контурный график.

### Введение

Одним из способов повышения технологической прочности сварных конструкций является управление кристаллизацией сварочной ванны. Объектом управления является сварочный инструмент или же расплав сварочной ванны, на который накладывается периодическое воздействие в виде колебаний или вибраций. Кристаллизация металла сварочной ванны в таких условиях способствует формированию мелкозернистой структуры металла сварного шва и направленного роста кристаллов, обуславливающих получение высоких механических свойств [1–3].

Способом наложения колебаний (вибраций) может быть механический, т. е. когда сварочная ванна [1–6, 8–12] или сварочный инструмент [2, 7] совершает колебательное движение в процессе сварки или наплавки; применение модулированного тока сварки [13]; периодическое влияние внешнего магнитного поля [14], которое определённым образом воздействует на расплав сварочной ванны, сварочную дугу [15] или лазерный луч [16].

Однако наиболее простым и дешёвым способом управления структурой кристаллизующегося металла сварочной ванны, не требующим дорогого и сложно-

го обладнання, остається механічний метод наложення зовнішніх коливань.

#### Аналіз публікацій по темі роботи

На сьогоднішній день існують і досліджуються технології зварки з різними типами механічного періодичного впливу на кристалізацію розплаву зварочної ванни. Так, застосування поперечних механічних коливань зварочної ванни дає можливість збільшити твердість наплавленого металу на 2,5 % при частоті 60 Гц і на 7,3% при частоті 376 Гц [4] на зразках з нержавіючої сталі.

Застосування продольних коливань зварочної ванни з частотою 400 Гц і амплітудою 40 мкм забезпечує формування зварного шва при зварці середньуглеродистого сталі з значно покращеними механічними властивостями: межа текучості збільшується на 21 %, межа міцності на розтягнення – на 26 %, міцність на розрив – на 39 % порівняно з зразками, отриманими без впливу коливань [5].

В разі багаторазової ручної зварки плоских деталей з нержавіючої сталі застосування коливань при постійній амплітуді і частоті дозволило отримувати зварні шви з опором поширенню тріщин більшим на 25 % і міцністю на розрив більшою на 8,8 % порівняно з зразками, звареними без застосування коливань [6]. Поєднуючи поперечні коливання зварочної горелки і імпульсний режим зварки, можна виконувати багаторазову автоматичну зварку без застосування формуючої підкладки зворотного боку шва вже на частоті 2,5 Гц. При цьому глибина вище, ніж при частоті в 5 Гц [7].

Застосування коливань зварочної ванни при зварці алюмінієвого сплаву AA7075 дозволило суттєво підвищити стійкість до утворення гарячих тріщин. Так при частоті 2050 Гц, повідомленої зварочної ванні, вдалося знизити чутливість до утворення гарячих тріщин до 20 %, в той час як при відсутності коливань ця величина досягала 82 %. Однак застосування частоти коливань ванни порядку 100 Гц не тільки не зменшує чутливість до утворення гарячих тріщин, а збільшує її до 87 % [8].

Автори роботи [9] виготовляли зварку зразків з малоуглеродистого сталі з зануреним в зварочну ванну вібратором, який передає коливання від ЕРМ двигача зварочної ванни з максимальною частотою 300 Гц і амплітудою 0,5 мм. Зразки, зварені на даній частоті, мали збільшену міцність, обумовлену сприятливою орієнтацією кристалів і їх дрібненням. При цьому межа текучості збільшилася на 27 %, межа міцності на розтягнення – на 23 % порівняно з зразками, отриманими без впливу коливань.

Ключовою особливістю технології наложення коливань при ручній зварці зразків з малоуглеродистого і нержавіючої сталей, описаної в роботі [10], є застосування вібрируючих граверів, куди

вставляється рука зварника з горелкою. Частота коливань в експериментах складала 600, 800 і 1000 Гц, а амплітуди 0,235; 0,324 і 0,425 мм відповідно. Відзначено, що завдяки дрібненню дебритів вдалося максимально (при 1000 Гц) збільшити ударну в'язкість зварених зразків на 25 %.

Повідомлено про зварочну ванну коливань частотою 47,5 Гц з амплітудою 1 мм, технологією аргондугової зварки легированої сталі вдалося отримати зварні шви з збільшеною на 35 %, а в зоні плавлення на 58 % значенням ударної в'язкості порівняно з аналогічними режимами зварки без застосування коливань [11].

В роботі [12] досліджувалися механічні властивості і мікроструктура металу шва, отриманого з нержавіючої сталі ручною дуговою зваркою електродом ЦТ-15 з застосуванням коливань зварочної ванни. Дослідження показали, що при застосуванні коливань на частоті 50 і 100 Гц і амплітуді від 0,6 до 0,8 мм опір усталостному руйнуванню зварного з'єднання при навантаженні в області еластичних деформацій збільшується на 18...22 %, а при ультразвукової ударної обробці на частоті 25...27 кГц – на 24...26 % порівняно з зваркою без якихось коливань. При цьому розмір зерна зменшується більше всього при частоті 50 Гц – на 23,1 %, в той час як при частоті 100 Гц – на 15,4 %, а при ультразвуковому впливі всього на 3,8 %.

Застосовуючи коливання дуги частотою 5 Гц при співвідношенні струму імпульсу і базового струму рівного 2,2, вдалося отримати зварні шви на зразках з магнієвого сплаву з значенням межі міцності на розрив металу зварного шва, на 78 % більшою порівняно з матеріалом основи [13].

З приведених прикладів випливає, що застосування періодичного механічного впливу в процесі зварки формує кристали в період кристалізації тонкими і прискорює їх ріст, що сприятливо впливає на механічні властивості, такі як твердість, межа текучості, ударна в'язкість і особливо межа міцності на розрив (збільшення на 39 % [5] і 58 % [11]) і чутливість до утворення гарячих тріщин (зниження до 20 % [8]). Таким чином, виникає необхідність вивчення впливу коливань на якийсь універсальний параметр, зміною якого можна було б мати представлення про вплив на комплекс механічних властивостей металу шва в цілому. Як показано в роботі [17], таким порівняльним критерієм може виступати показник твердості. Саме твердість характеризує такі механічні властивості, як опір пластичній деформації, і представляє собою механічне властивість металу, що відрізняється від інших його механічних властивостей способом вимірювання. Оцінка зміцнення металів і сплавів за критерієм твердості дає можливість порівнювати матеріали з різним рівнем пластичності, навіть абсолютно крихкі з пластичністю, близькою до нуля.

С другой стороны, из приведенного краткого анализа следует, что большинство исследований касается частотного ряда колебаний превышающего 10 Гц, а характер влияния колебаний, на свариваемый металл ограничивается одной плоскостью, однако характерные изменения микроструктуры наблюдаются уже при частоте 2,5 Гц [3].

Целью данной работы является изучение влияния амплитудно-частотных характеристик низкочастотных механических колебаний сварочной ванны на значение твёрдости наплавленного металла и ЗТВ. Ключевой особенностью исследований является тип поперечных колебаний. Они представляют собой возвратно-поступательное движение по дуге окружности, как показано на рис. 1. Величина угла отклонения от положения вертикали не превышает 20°. Значение частоты колебаний не превышает 4,5 Гц при амплитуде до 7 мм.

### Методы и материалы

Эксперименты представляют собой механизированную наплавку плавящимся электродом в среде углекислого газа. В качестве плавящегося электрода применялась стальная омеднённая проволока типа СВ 08 Г2С (ER70S-6 – С 0,08; Si 0,9; Mn 1,5) 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. Величина тока наплавки определялась амперметром, расположенным на лицевой части источника питания 2. Источник питания является собой выпрямитель 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 с от момента начала горения дуги посредством блока управления 7. Подача и регулировка углекислого газа подаётся из газового баллона 8 посредством редуктора.

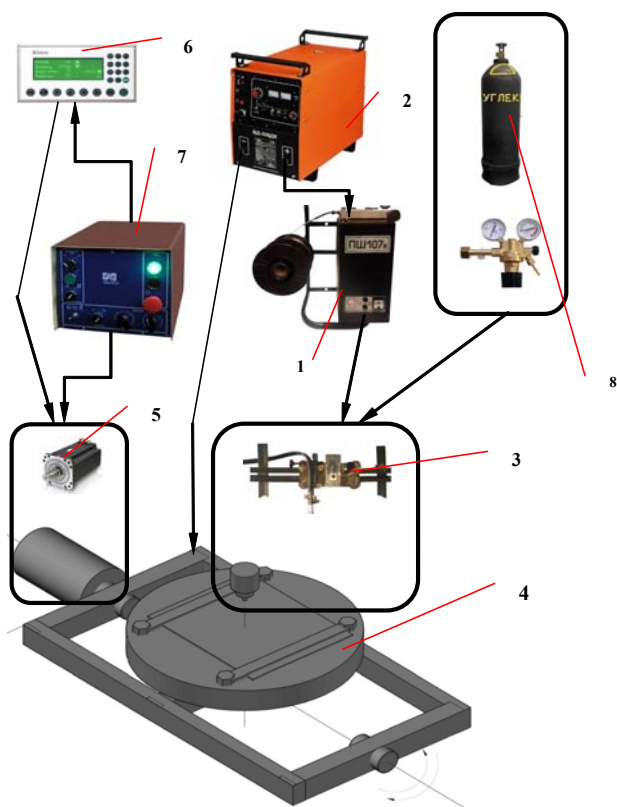
В качестве заготовки для наплавки были использованы прямоугольные пластины из низкоуглеродистой стали типа Ст3, толщиной 8 мм, размером 34×25 мм. Перед наплавкой каждая деталь была очищена от за-

щитного покрытия, ржавчины и масел посредством механической шлифовки. 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.

Технологические режимы наплавки и амплитудно – частотные характеристики колебания стола с наплавляемой деталью разработаны в соответствии с методикой планирования эксперимента по методу «латинского квадрата» [18]. 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  $\chi$ . Режимы экспериментов и представлены в табл. 1.

Для измерения твёрдости после наплавки из всех образцов были изготовлены микрошлифы, обработанные механической обработкой до чистоты 14 класса. Каждый микрошлиф был подвергнут химической обработке путём травления в 4 %-ном спиртовом растворе азотной кислоты в течение 10 с.

Измерения величины твёрдости проводились в верхней части, середине и корневой зоне каждого валика (рис. 2). Результаты измерений приведены в таблице 2.



**Рис. 1.** Установка для наплавки в среде углекислого газа с колебаниями сварочной ванны: 1 – полуавтомат сварочный; 2 – источник питания сварочной дуги; 3 – сварочная горелка и механизм её перемещения; 4 – подвижный стол с закреплённой деталью; 5 – шаговый двигатель; 6 – пульт управления шаговым двигателем; 7 – блок управления шаговым двигателем; 8 – баллон с углекислым газом

**Таблиця 1** – Технологіческие режимы и амплитудно-частотные характеристики экспериментов

Номер эксперимента	Ток наплавки $I_n$ , А	Скорость наплавки $V_n$ , м/ч	Частота колебаний $\nu$ , Гц	Амплитуда колебаний $A$ , мм
1	100	10	4	7
2	100	14	3,5	6
3	100	18	4,5	3
4	100	22	2,5	4
5	100	26	3	5
6	125	10	3,5	3
7	125	14	3	7
8	125	18	4	4
9	125	22	4,5	5
10	125	26	2,5	6
11	150	10	4,5	6
12	150	14	4	5
13	150	18	2,5	7
14	150	22	3	3
15	150	26	3,5	4
16	175	10	3	4
17	175	14	2,5	3
18	175	18	3,5	5
19	175	22	4	6
20	175	26	4,5	7
21	200	10	2,5	5
22	200	14	4,5	4
23	200	18	3	6
24	200	22	3,5	7
25	200	26	4	3

**Результаты экспериментов и обсуждение**

Обработка экспериментальных результатов производилась методом регрессионного анализа, что подразумевает построение полиномов с эмпирически опре-

делёнными коэффициентами. Это было осуществлено при помощи программного пакета STATISTICA.

Выражения для твёрдости  $B$  наплавленного металла и  $B_{зТВ}$  [Па] имеют вид:

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

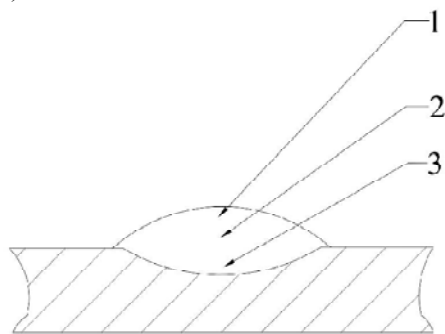
$$\begin{aligned}
 B_{зТВ} = & 1,384384 \cdot 10^9 - 1,394832 \cdot 10^{12} \cdot I_n \cdot A^2 + 1,607340 \cdot V_n \cdot \nu^2 - \\
 & - 1,310467 \cdot 10^{11} \cdot A \cdot \nu^2 + 5,471284 \cdot 10^{11} \cdot I_n \cdot V_n^2 + 4,611754 \cdot 10^7 \cdot A \cdot I_n^2 - \\
 & - 2,478328 \cdot 10^7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

**Таблица 2** – Значения твердости наплавленного металла и металла ЗТВ

№ Образца	Твердость по Виккерсу наплавленного металла (нагрузка 1 кг), $\times 10^7$ Па			Твердость по Виккерсу ЗТВ (нагрузка 1 кг), $\times 10^7$ Па		
	Верх шва	Центр шва	Корень шва	Верх шва	Центр шва	Корень шва
1	195	193	187	217	224	208
2	199	203	203	212	203	224
3	217	226	223	254	261	266
4	223	223	233	233	229	229
5	221	201	210	217	214	221
6	205	199	217	208	207	208
7	218	219	222	210	218	214
8	222	224	232	250	245	248
9	250	232	229	270	275	272
10	260	279	271	320	313	317
11	214	214	224	202	205	205
12	229	229	229	245	243	245
13	214	210	210	197	193	195
14	222	217	232	258	260	264
15	251	257	251	283	287	287
16	208	207	203	220	222	225
17	202	173	178	173	178	175
18	208	214	224	228	228	230
19	222	219	238	227	232	229
20	208	219	212	229	228	229
21	193	193	192	200	198	203
22	219	225	229	225	229	229
23	217	226	218	213	215	214
24	216	214	210	217	218	219
25	203	205	179	215	215	213

Данные уравнения имеют коэффициенты детерминации 85 и 88 соответственно.

Наиболее оптимальный с точки зрения твердости технологический режим определялся сравнением величины твердости при влиянии колебаний и без них (табл. 3).



**Рис. 2.** Схема измерения твердости в наплавленном валике:  
1 – верхняя часть, 2 – середина, 3 – корневая зона

Был отобран режим № 2 при значении твердости металла валика  $219,7 \times 10^7$  Па и ЗТВ –  $214 \times 10^7$  Па, что превышает на 31,7 % твердость металла сварного шва и на 25,3 % твердость металла ЗТВ, полученных наплавкой без колебаний.

Для данных значений тока и скорости наплавки были построены контурные графики по зависимостям (1) и (2) (рис. 3) при помощи пакета Mathcad, из которых видно, что оптимальное значение твердости наплавленного металла и металла ЗТВ будет получено при частоте 3 Гц и амплитуде 0,005 м и будет лежать в пределах  $(223 \div 230) \cdot 10^7$  Па, что увеличит твердость наплавленного металла в среднем на 36 %, а металла ЗТВ на 33 %.

#### Выводы

1. Представлены эмпирические зависимости величины твердости наплавленного металла и металла ЗТВ от амплитуды и частоты гармонических колебаний, накладываемых на сварочную ванну, а также силы тока и

скорости наплавки в среде  $\text{CO}_2$  на подложку из Ст3 проволокой, аналогичной по составу Св08Г2С. Зависимости получены по методике регрессионного анализа по типу «латинского квадрата» и имеют коэффициент детерминации 85 и 88 соответственно.

2. Приведены сравнительные результаты измерения твёрдости наплавленного металла и металла ЗТВ образцов, наплавленных на различных технологических режимах с колебаниями и без них. На основании этих результатов был выбран тот технологический режим, на котором была получена максимальная разница в

твёрдости с применением колебаний и без них:  $I_H = 125$  А;  $V_H = 0,0039$  м/с. Применяя полученные эмпирические зависимости, были построены контурные графики, что дало возможность оценить максимально возможное значение твёрдости равное  $(223 \div 230) \cdot 10^7$  Па для данного технологического режима и определить необходимые амплитудно-частотные характеристики колебаний:  $A = 0,007$  м,  $\nu = 3$  Гц. Применение данных технологического и колебательного режимов даёт возможность увеличить твёрдость наплавленного металла и металла ЗТВ на 36 % и 33 % соответственно.

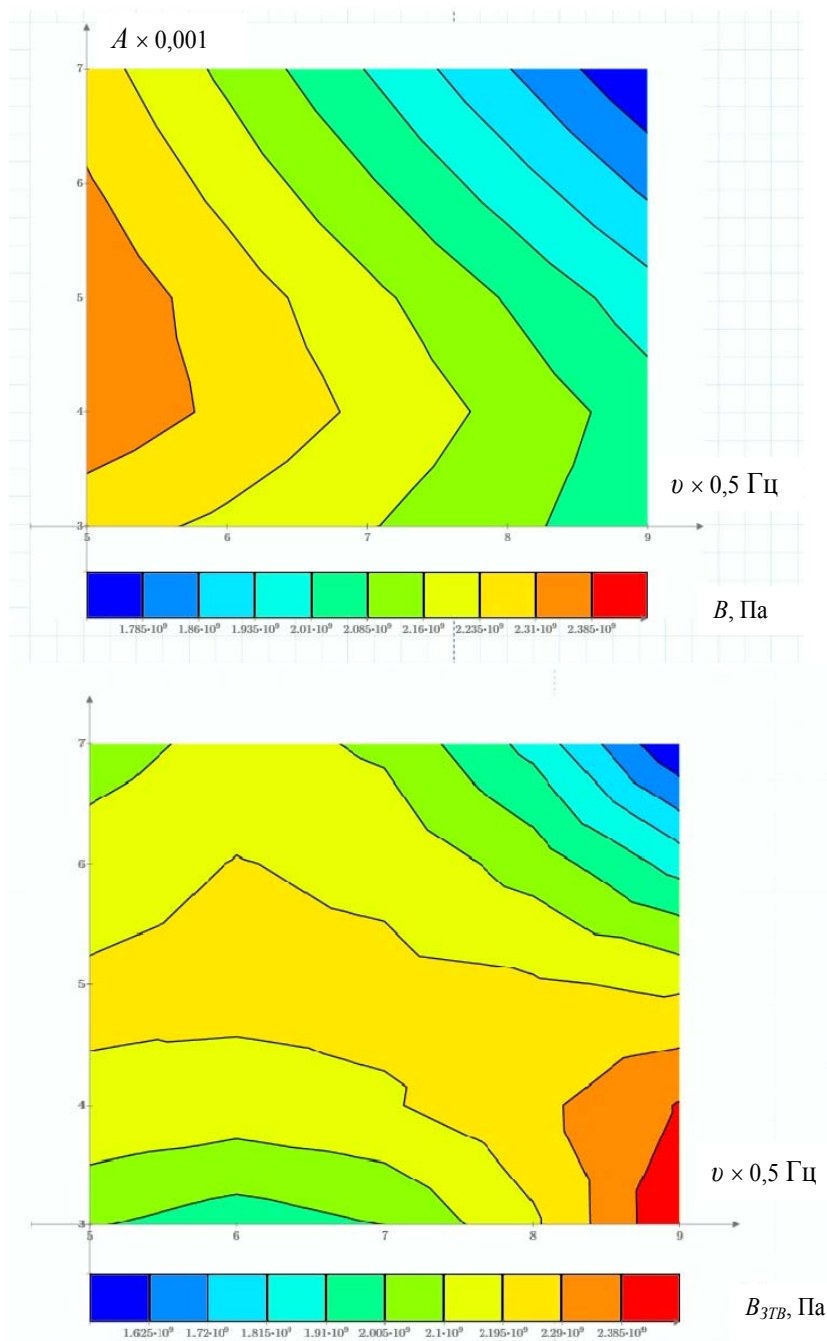


Рис. 3. Контурные графики зависимости значений твёрдости наплавленного металла и ЗТВ от частоты и амплитуды колебаний для режима наплавки  $I_H = 125$  А;  $V_H = 0,0039$  м/с

## Список литературы

1. Preferred Orientation of Inconel 690 after Vibration Arc Oscillation Welding / [Che-wei Kuo, Sheng-Min Yang, Jie-Hao Chen and etc.] // Materials Transactions. – 2008. – Vol. 49(3). – P. 688–690. DOI:10.2320/matertransmep2007305
2. Jose M. J. Vibration assisted welding processes and their influence on quality of welds / M. J. Jose, S. S. Kumar, A. Sharma // Science and Technology of Welding & Joining. – 2016. – Vol. 21(4). DOI: 10.1179/1362171815y.0000000088
3. Agni Arumugam Selvi Effect of linear direction oscillation on grain refinement / Agni Arumugam Selvi // Thesis. – 2014. Master of Science, Ohio State University, Mechanical Engineering, 45 p.
4. Evolution of microstructure and residual stress under various vibration modes in 304 stainless steel welds / [Chih-Chun Hsieh, Peng-Shuen Wang, Jia-Siang Wang, Wei-te Wu] // The Scientific World Journal. – Volume 2014, Article ID 895790, 9 pages. DOI:10.1155/2014/895790
5. Tewari S. P. Influence of Longitudinal Oscillation on Tensile Properties of Medium Carbon Steel Welds of Different Thickness / Tewari S. P. // Thammasat Int. J. Sc. Tech. – 2009. – Vol. 14. – № 4. – P. 17–27.
6. Gill J. S. Effect of Weld Pool Vibration on Fatigue Strength and Tensile Strength of Stainless-Steel Butt-Welded Joints by GTAW Process / Gill J. S., Kalyan Reddy T. // Proceedings of the World Congress on Engineering. – 2018. – Vol II WCE 2018, July 4–6, 2018, London, U.K.
7. In process control of weld pool using weaving control in switch back welding / [Yamane S., Yoshida T., Nakajima T. and etc.] // Quarterly Journal of the Japan Welding Society. – 2009. – Vol. 27. – № 2. – P. 32–36. DOI:10.2207/qjws.27.32s
8. Studies on the effect of vibration on hot cracking and grain size in AA7075 aluminum alloy welding / Balasubramanian K., Balusamy V., Kesavan D. // International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST). – 2011. – Vol. 3. – № 1. – P. 681–686.
9. Development of vibratory welding technique and tensile properties investigation of shielded metal arc welded joints / Pravin Kumar Singh, Patel D., Shashi B. Prasad // Indian Journal of Science and Technology. – 2016. – Vol. 9(35). – P. 1. – 6. DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i35/92846
10. Effect of frequency on impact strength of dissimilar weldments produced with vibration / J. Kalpana, P. Srinivasa Rao, P. Govinda Rao // Int. J. Chem. Sci. – 2016. – Vol. 14(3). – P. 1797–1804. DOI: 10.13140/RG.2.2.17394.91840
11. Салмин А. Н. Исследование влияния вибрационных колебаний в процессе сварки на технологическую прочность и механические свойства сварных соединений из стали 11Х11Н2В2МФ / Салмин А. Н., Файрушин А. М., Ибрагимов И. Г. // Сетевое издание «Нефтегазовое дело». – 2010. – № 2. – С. 1–8.
12. Зарипов М. З. Исследование влияния вибрационных и ультразвуковых колебаний в процессе варки на свойства сварных соединений нефтегазового оборудования из стали 12Х18Н10Т / Зарипов М. З., Ибрагимов И. Г., Ризванов Р. Г. // Сетевое издание «Нефтегазовое дело». – 2010. – №2. – С. 1–12.
13. Subravel V. Optimizing the magnetic arc oscillation process parameters to attain maximum tensile strength using RSM / Subravel V., Padmanaban G., Balasubramanian V. // Journal of Manufacturing Engineering. – 2017. – Vol. 12(1). – № 3. – P. 49–54.
14. Razmyshlyayev A. D. TMF Influence on Weld Structure at the Welding of 12X18H9T / Razmyshlyayev A. D., Aheieva M. V., Lavrova E. V. // Materials Science Forum. – 2018. – Vol. 927. – P. 1–5. DOI:10.4028/www.scientific.net/msf.927.1
15. Sundaresan S. Use of magnetic arc oscillation for grain refinement of gas tungsten arc welds in  $\beta$ -titanium alloys / Sundaresan S., Ram G.D.J. // Science and Technology of Welding and Joining. – 1999. – V.4 (3). – P. 151 – 160. DOI:10.1179/136217199101537699
16. Laser beam micro welding with high brilliant fiber lasers / [Schmitt F., Mehlmann B., Gedicke J. and etc.] // JLMN-Journal of Laser Micro/Nanoengineering. – 2010. – Vol. (5). – № 3. – P. 197–203. DOI:10.2961/jlmn.2010.03.0003
17. Шевельков В. В. Твёрдость – критерий упрочнения металлических материалов / Шевельков В. В. // Вестник ПсковГУ. Серия «Экономические и технические науки». – 2014. – №5. – С. 125–134.
18. Протодьяконов М. М. Методика рационального планирования эксперимента / Протодьяконов М. М., Тедер Р. И. – М. : Наука, 1970. – 76 с.

Одержано 21.11.2019

## Лебедєв В. О., Новиков С. В., Соломійчук Т. Г. Визначення твердості наплавленого металу і металу зони термічного впливу (ЗТВ) під час низькочастотних коливань зварювальної ванни

**Актуальність роботи.** Використання механічних гармонійних коливань зварювальної ванни або інструменту є недорогим і досить простим засобом формування бажаного ступеня дисперсності структури, а й, відповідно, міцності наплавленого металу. Можливість по-різному прикладати коливання щодо осі наплавлення (зварювання) дозволяє формувати зварювальний шов або наплавлюваній валик з певною анізотропією механічних властивостей у заданому напрямку.

Дослідженню формування мікроструктури в умовах періодичного впливу на розплав присвячена велика кількість робіт. Однак дослідження стосуються здебільшого вивчення впливу коливань із значеннями частоти значно більшими 5 Гц й значеннями амплітуди від декількох мікрон до 2–3 мм.

Досліджується можливість впливу на величину твердості наплавленого металу і металу зони термічного впливу (ЗТВ) завдяки коливанням розплаву зварювальної ванни з частотним діапазоном 2,5–4,5 Гц і амплітудним діапазоном 3–7 мм.

**Мета роботи** – отримання кількісних залежностей, що визначають величину твердості наплавленого металу і металу ЗТВ як функцію від параметрів технологічного і коливального режимів.

**Методи дослідження.** Для досліджень зразки були підготовлені і відполіровані до 14 ступеня чистоти за ДСТУ 25593-83. Наплавлення проводилося легованим дротом у середовищі вуглекислого газу, де зварювальний зразок був з вуглецевої сталі типу Ст3.

Твердість за Віккерсом визначалася за допомогою твердоміра LECO M-400 з навантаженням індентером 1 кг згідно з ДСТУ ISO 6507-1: 2007. Результати вимірювань оброблялися методом регресійного аналізу за допомогою програмних пакетів STATISTICA 12 і PTC Mathcad Prime 3.1.

**Результати.** Отримано регресійні моделі залежності величини твердості наплавленого металу і металу ЗТВ від сили струму і швидкості наплавлення, амплітуди і частоти гармонійних коливань зварювальної ванни. За отриманими моделям побудовані контурні графіки залежності величини твердості від амплітудно-частотних характеристик коливань. Наведено варіант прогнозу отримання максимальної твердості наплавленого металу і металу ЗТВ при струмі наплавлення 125 А і швидкості наплавлення 14 м/ч.

**Наукова новизна.** Були проведені експерименти з наплавлення зразків при різних коливальних режимах зварювальної ванни, що здійснювалися за допомогою застосування програмованого крокового двигуна.

Побудовано емпіричні залежності впливу величин струму і швидкості наплавлення, частоти і амплітуди коливань певного діапазону на величину твердості наплавленого металу і ЗТВ.

**Практична цінність.** Доведено можливість підвищення твердості наплавленого металу і ЗТВ за рахунок застосування коливань зварювальної ванни цього амплітудно-частотного діапазону. Визначено значення амплітуди і частоти коливань при оптимальних значеннях сили струму і швидкості наплавлення, що дозволяють отримати максимальне значення твердості.

**Ключові слова:** наплавлення, коливання, твердість, ЗТВ, регресійна модель, контурний графік.

#### **Lebedev V., Novykov S., Solomiichuk T. Determination of the hardness of the weld metal and the metal of the heat affected zone (HAZ) during low-frequency oscillations of the weld pool**

**Work relevance.** The using of mechanical harmonic oscillations of welding pool or tool are inexpensive and quite simple procedure formation desirable degree of dispersion structure it means weld metal strength. Possibility of oscillations differently applied relative of the surfacing (welding) process axis lets welding seam or surfacing bead formation with certain anizotropy of mechanical properties in given direction.

Many works have dedicated of researches of microstructure formation by conditions of periodic action on weld melt. However, the most part of it are devoted mostly researching to influence oscillations with frequency much superior value of 5 Hz and amplitude value range from some microns to 2–3 mm.

**Purpose of work** is getting quantity dependencies which defining hardness value of weld metal and metal of HAZ as a function of technological and oscillations modes parameters.

**Research methods.** For researchers the samples have had prepared and polished to #8 Mirror Finish by ISO (ГОСТ 25593 – 83). The surfacing process in CO<sub>2</sub> protection environment had has carried out by alloy wire named G3Si1 by EN 13479 ISO 143341 (ТУ V 322-4-392-96) which diameter 1.2 mm. Base metal was common quality carbon steel type E 235-C by ISO 630:1995, ISO 1052:1982 (ДСТУ 2651:2005). Measurement of hardness (by Vickers) had carried out on hardness tester named LECO M-400 under indenter load 1 kg by ISO 6507-1:2007 (ДСТУ ISO 6507-1:2007). Research resultants had treatment by regression analysis methods with application of analytics software package STATISTICA 12 and engineering math software PTC Mathcad Prime 3.1.

**Results.** Regressive models of hardness value as function magnitudes arc current, the surfacing process velocity, amplitude and frequency oscillations have received. Contour plots of depend of hardness value from amplitude and frequency magnitudes were created. Variant of predict of the receiving maximum value hardness weld metal and metal of HAZ at arc current 125 A and the surfacing process speed 14 m/h are presented.

**Scientific novelty.** The experiments were carried out with different amplitude and frequency values which were given through programming step motor.

Empirical depends of influence of technological and oscillation modes parameters of certain range on weld metal hardness and metal HAZ hardness values are created.

**Practical value.** An increase possibility of hardness values of weld metal and metal of HAZ due to use weld pool oscillations with frequency value range 2.5–4.5 Hz and amplitude value range 3–7 mm was proven. The magnitudes of amplitude and frequency permitting receives maximum hardness values at optimal values of arc current and the surfacing velocity were obtained.

**Key words:** the surfacing, oscillation, hardness, HAZ, regression model, contour graph.