

ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОЗВАРЮВАННЯ ІМ. Є.О. ПАТОНА
НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

НОВИКОВ СЕРГІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ

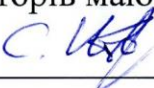
УДК 621.791.927.5

ДИСЕРТАЦІЯ
**ДУГОВЕ НАПЛАВЛЕННЯ З НИЗЬКОЧАСТОТНИМИ МЕХАНІЧНИМИ
КОЛИВАННЯМИ ПЛАСКОЇ ДЕТАЛІ**


Спеціальність 05.03.06 – «Зварювання та споріднені процеси і технології»

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело


_____ С.В. Новиков

Науковий керівник: Лебедев Володимир Олександрович, д.т.н., професор



Київ-2025

АНОТАЦІЯ

Новиков С.В. Дугове наплавлення з низькочастотними механічними коливаннями пласкої деталі. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.06 – зварювання та споріднені процеси і технології. – Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2025.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню особливостей технологічного впливу поперечних механічних коливань на процес дугового наплавлення в середовищі вуглекислого газу. Коливання являють собою періодичний рух за траєкторією дуги окружності деталі, що наплавляється. Частотний діапазон коливань є від 2,5 Гц до 4,5 Гц, амплітудний – від 3,0 мм до 7,0 мм. Дугове наплавлення здійснюється аналогом суцільного дроту Св-08Г2С діаметром 1,2 мм на пласкі зразки середнім розміром 220,0 мм × 35,0 мм × 8,0 мм з конструкційної вуглецевої сталі типу Ст3сп звичайної якості силою струму наплавлення від 100,0 А до 200,0 А при швидкості наплавлення від 10,0 м/год до 26,0 м/год. Захисний газ – вуглекислий, з витратою від 15,0 л/хв до 25,0 л/хв.

Характеристиками, що визначають вплив коливань означеного типу на процес дугового наплавлення, обрано:

- геометричні: ширина та висота наплавленого валику;
- мікроструктури: розмір зерна кристаліту, тип структурних складових;
- механічні: величина твердості наплавленого металу та металу зони термічного впливу (ЗТВ);
- технологічні: величина періоду горіння дуги між короткими замкненнями при перенесенні електродного металу у зварювальну ванну.

За обраним типом коливань створено оригінальну установку для наплавлення з автоматичним переміщенням зварювального пальника, подаванням електродного дроту та захисного газу, де коливальним приводом є програмований кроковий

двигун. Основними критеріями створення установки були простота конструкції та доступність складових.

Метод електродугового наплавлення та зварювання широко використовується у різноманітних галузях техніки та народного господарства, що обумовлює актуальність вдосконалення існуючих та дослідження нових методів підвищення якості зварних конструкцій та наплавлених поверхонь.

Одним з технологічних прийомів модифікування наплавленого металу є періодичний вплив на розплав зварювальної ванни, що здійснюється переважно механічним способом. Більшість існуючих досліджень стосується впливу дуги, що періодично переміщується з частотою за орієнтованим діапазоном від 1,0 Гц до 1,0 кГц та амплітудним – від десятків мікрон до 2,0 мм відносно поверхні виробу, що наплавляється (зварюється). Проте у деяких дослідженнях показано, що мікроструктура наплавленого металу починає змінюватись вже за частоти періодичного впливу близької від 1,0 Гц до 1,5 Гц. Тому, актуальним є дослідження якості наплавленого металу, отриманого в умовах періодичної дії частотою в околі значень від 1,0 Гц до 1,5 Гц та за амплітудою від 2,0 мм і вище.

Метою роботи є оптимізація властивостей відновленого поверхневого шару опорних плит гідравлічного пресу дуговим наплавленням з використанням механічних низькочастотних коливань поверхні деталі обраного типу, встановлення закономірностей впливу цих коливань та режимів наплавлення на структуру та властивості наплавленого металу та металу зони термічного впливу.

Об'єктом дослідження є комплекс властивостей наплавленого металу: твердість, мікроструктура, геометричні розміри наплавленого валику, процес перенесення електродного металу.

Предметом дослідження є наплавлений метал, отриманий з використанням механічних низькочастотних гармонійних коливань зазначеного типу зразка, що наплавляється.

Наукова новизна одержаних результатів. У роботі проведені комплексні дослідження щодо підвищення твердості відновленого поверхневого шару опорних

пластин пресів, які використовуються у поліграфічному виробництві методом дугового наплавлення з використанням механічних низькочастотних коливань опорної пластини. До новизни дослідження можна віднести такі положення:

1. Вперше досліджено можливості модифікування низьколегованого наплавленого металу адитивною дією механічних низькочастотних коливань, що здійснюються у вертикальній та горизонтальній площинах та практично реалізується періодичним рухом зварювального виробу за траєкторією дуги окружності з частотою за діапазоном від 2,5 Гц до 4,5 Гц та з амплітудою – від 3,0 мм до 7,0 мм.
2. Вперше встановлено, що модифікування поверхневого шару деталі, що наплавляється дуговим наплавленням під дією механічних коливань означеного типу за частоти 2,5 Гц, амплітуди 7,0 мм, забезпечує максимальне збільшення твердості наплавленого металу відносно наплавлення без коливального впливу, що обумовлене як диспергуванням мікроструктури, так і формуванням в ній зерен із структурними складовими з високою твердістю: голчастого та пластинчатого фериту, сорбітоподібного перліту та бейніту.
3. Доведена можливість збільшення ширини наплавлених валиків від 1,3 рази до 1,8 рази, зменшення їх висоти – від 1,2 рази до 6,4 рази та глибини проплавлення основного металу у 2,0 рази у порівнянні з наплавленням без коливань, що обумовлене розосередженням розплаву зварювальної ванни на значну площу основного металу.

Практичне значення отриманих результатів. Створено установку для наплавлення плоских деталей з функцією їх коливань за напрямком дуги окружності, що обумовлює підвищену твердість наплавленого металу та формування валиків з ефективними геометричними розмірами. Розроблено технологічні рекомендації щодо наплавлення на плоскі поверхні деталей з вуглецевих сталей типу СтЗсп економно-легованим дротом на основі отриманих статистичних та аналітичних залежностей, достовірність яких перевірено при відновлювальному наплавленні робочих поверхонь опорних плит гідравлічного

пресу, що використовуються у поліграфічному виробництві для обтискання книжних блоків, брошур, постерів та інших поліграфічних виробів. Даний спосіб наплавлення було реалізовано на підприємстві Видавничий Дім «Фоліант» у м. Київ, що підтверджується відповідним актом впровадження. Доведена можливість наплавлення легованим дротом типу Нп-30ХГСА на визначеному оптимальному режимі з прогнозованим підвищенням мікротвердості наплавленого металу у порівнянні з відповідним наплавленням без коливального впливу, що довело перспективність використання даного методу наплавлення для більш легованих дротів.

Характеристика роботи. У вступі наведено відомості про загальний стан вивчення ампліудно-частотного діапазону періодичного впливу на наплавлений метал, його реалізацію механічним способом та недоліки у спектрі сучасних досліджень і обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та задачі дослідження, висвітлено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів. Представлено інформацію про зв'язок роботи з науковими темами та апробацію результатів дисертації, наведено публікації автора, в яких викладено основний зміст дисертаційної роботи.

У розділі 1 проаналізовано існуючі джерела, що висвітлюють сучасний стан досліджень щодо вивчення фізичних аспектів, що обумовлюють природу періодичного впливу на розплав зварювальної ванни та формування мікроструктури і відповідних змін службових властивостей наплавленого металу. Визначено, що єдиної теорії щодо опису фізичних явищ у зварювальній ванні під час кристалізації не створено. Більшість досліджень спирається на гіпотези та фізичні чи статистичні моделі, побудованих для окремих умов реалізації експериментів. Визначено ампліудно-частотний діапазон періодичного впливу щодо подальших досліджень.

У розділі 2 наведено вибір основних вузлів установки для наплавлення, наведено розрахунки щодо вибору елементів генерації коливань: крокового двигуна, його драйверу, блоку керування; відомості про зварювальні матеріали,

методи досліджень, які використовувалися в процесі виконання дисертаційної роботи.

У розділі 3 наведено аналітичні розрахунки щодо взаємозв'язку швидкості наплавлення, струму наплавлення, періоду горіння дуги з параметрами коливань. Проаналізовано вплив коливань на стабільність горіння дуги, ступінь розбризкування електродного дроту та енерговміст дуги.

У розділі 4 представлено результати дослідження твердості наплавленого металу та металу ЗТВ, геометричних розмірів валику, отриманого в умовах коливань означеного типу. Дослідження твердості та висоти валику проводились на основі регресійних моделей, побудованих за планом експериментів за методом "латинський квадрат". Дослідження ширини наплавленого валику проводилось на основі аналітичної моделі, що отримана як рішення системи рівнянь примусових коливань гармонійного осцилятора та динаміки обертального руху коливальної системи. На основі аналізу моделей визначено режим наплавлення щодо отримання валика з оптимальними значеннями твердості та геометричних розмірів.

У розділі 5 наведені результати аналізу мікроструктури металу наплавлених валиків, отриманих за планом експериментів методом "латинський квадрат". Встановлені основні структурні складові мікроструктури наплавленого металу та металу ЗТВ та встановлені основні відмінності у мікроструктурі цих валиків у порівнянні з валиками, що отримані без впливу коливань. Також наведено аналіз розміру кристаліту в залежності від параметрів коливань та параметрів режиму наплавлення на основі регресійної моделі, що будувалась за тих умов, що й попередні моделі, вказані у пункті 4. Встановлено взаємозв'язок між величиною твердості наплавленого металу та розміру кристаліту. Наведено впровадження результатів досліджень щодо модернізації технології відновлення поверхонь опірних плит гідравлічних пресів, що використовуються у поліграфічному виробництві для обтискання книжних блоків, брошур, постерів та інших поліграфічних виробів.

Ключові слова: дугове наплавлення, коливання зразка що наплавляється, розмір кристаліту, ширина валика, висота валика, твердість наплавленого металу, амплітуда коливань зварювальної ванни, частота коливань зварювальної ванни.

ANNOTATION

Novykov S. Surfacing by GMAW-S with low-frequency mechanical oscillations of a flat specimen. - Manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 05.03.06 "Welding and related process and technologies" – E.O. Paton Electric Welding Institute of National Academy of Sciences of Ukraine – National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, 2025.

The dissertation is devoted to the study of a technological influence features of transverse mechanical oscillations on surfacing weld process by Short Circuit Gas Metal Arc Welding (*GMAW-S*). Weld specimen oscillations were a periodic motion along trajectory tangential to circle arc. Frequency oscillations range was from 2.5 *Hz* to 4.5 *Hz*, amplitudes range was from 3.0 *mm* to 7.0 *mm*, welding currents range was from 100.0 *A* to 200.0 *A*, welding travel speeds range was from 10.0 *m/h* to 26.0 *m/h*, shielding gas was carbon dioxide with consumption from 15.0 *l/min* to 25.0 *l/min*. Surfacing process was carried out with welding wire *ER70S-6* with diameter 1.2 *mm* on flat specimens. Average size of specimens was 220.0 *mm* × 35.0 *mm* × 8.0 *mm*. Material specimens was structural carbon steel *Fe37-3FN* type with ordinary quality.

Deposited metal main characteristics under investigation were:

- geometric: width and height of weld bead;
- microstructures: crystallite grain size, structural components type;
- mechanical: hardness of deposited metal value and hardness value of heat- affected zone (*HAZ*) of base metal;
- technological: period value of short-circuiting transfer of welding wire metal.

Based on oscillations type chosen, original installation for surfacing weld by *GMAW-S* with automatic movement of arc welding torch, welding wire feed and shielding gas was created. Oscillatory drive in installation was programmable stepper motor. Main criteria of the installation create were simplicity design and components availability.

The methods of surfacing and welding is widely used in various engineering and economy branches, these determines relevance of quality improving and efficiency of welding structures and surfacing welds. One of technological methods of modifying deposited metal is periodical impact on the welding pool melt, it is carried mainly out mechanically. Most of studies on which modern appropriate equipment based is created relate mainly to welding arc periodically movement impact relatively by detail surface being surfacing (welded) with frequency oscillations range is from few unit's *Hz* and hundreds *kHz*, and amplitude is from tens μm to 2.0 *mm*. However, some investigations of deposited metal microstructure begin to change already at periodic movement of welding arc frequency about ranging from 1.0 *Hz* to 1.5 *Hz* have shown. Therefore, it is relevant to study the periodic impact on deposited metal microstructure with amplitude-frequency characteristics ranged frequency value up to 10.0 *Hz* and amplitude value from 2.0 *mm*.

The aim of the work is optimization of properties of restored surface layer of ram and bed bolsters of hydraulic press by *GMAW-S* surfacing using mechanical low-frequency oscillations of the selected type of specimen, establishing the laws of influence of these oscillations and welding modes on structure and properties of deposited metal and metal of *HAZ*.

The object of the study is complex of deposited metal properties: hardness, microstructure, geometric dimensions of weld bead, short circuiting transfer process.

The subject of the study is deposited metal obtained surfacing weld process by *GMAW-S* using mechanical low-frequency described type oscillations of surfacing specimen.

The scientific novelty of the obtained results. The scientific novelty of the obtained results. The work includes complex researches regarding modification of

deposited metal by arc-method due to application of mechanical low-frequency oscillations of support plates surfaces of presses used in printing production. The novelty of the study includes the following provisions:

1. For the first time, a new type of periodic influence on the welding pool melt was proposed for modification of a low-alloy deposited metal, which consists in additive effect of mechanical oscillations both in vertical plane and in horizontal plane, which is practically implemented as periodic movement of surfacing specimen along path of circular arc with given length in ranges of frequency from 2.5 Hz to 4.5 Hz and amplitudes from 3.0 mm to 7.0 mm .
2. For the first time, it was established that modification of surface of part deposited by *GMAW-S* under influence of mechanical oscillations of specified type with frequency of 2.5 Hz , amplitude of 7.0 mm , provides an maximum increase in hardness of deposited metal relative to surfacing without oscillatory influence, which is due to both the dispersion of microstructure and the formation it contains grains with structural components with high hardness: acicular and lamellar ferrite, sorbitol-like pearlite and bainite.
3. The possibility of width increasing of deposited beads ranging from 1.3 times to 1.8 times, reducing height of deposited beads from 1.2 times to 6.4 times and depth of the base metal penetration from to 2.0 times compared to surfacing without oscillations, which is due to dispersion of weld pool melt over a significant area of base metal, has been proven.

The practical significance of the results. An installation was created for surfacing weld process by *GMAW-S* with feasibility of transverse mechanical oscillations of surfacing flat specimens. Oscillations were made in the direction of tangent to circular arc. Application of that oscillations type caused hardness of the deposited metal value increased and welded beads formation with effective geometric dimensions. Technological recommendations have been developed for surfacing weld on flat surface of parts made of carbon steels *Fe37-3FN* type by economically alloyed welding wire (type *ER70S-6*) based on the obtained statistical and analytical dependencies. Reliability

of the dependencies had been checked during restored surfacing of working surfaces of support plates of hydraulic presses used in printing production for crimping book blocks, brochures, posters and other printing products. This surfacing method was implemented at the *Foliant* Publishing House (Kyiv) enterprise and was confirmed by relevant act of implementation. The possibility of surfacing with alloyed wire (type *SIGUAL M133*) at the determined optimal mode with predicted increase in the microhardness of deposited metal compared to corresponding surfacing without oscillatory influence was proven, which proved promising use of this surfacing method for more alloyed wires.

Characteristics of work. The introduction provided information on general state of researches of the amplitude-frequency range of periodic impact on the deposited metal, its realization by mechanical devices and shortcomings in spectrum of modern researches, as well substantiates the relevance of the topic, formulated the aim and subject of the study, highlights the scientific novelty and practical significance of the results. The information on connection of work with scientific themes and approbation of results of the dissertation were presented, publications of the author in which the basic maintenance of the dissertation work is stated were presented.

Section 1 analyzed the existing sources that highlight the current state of researches on study of physical aspects that determine nature of periodic impact on weld pool melt, microstructure formation and corresponding changes in properties of deposited metal as well. It was determined that a single theory concerning of physical phenomena description in the welding pool while crystallization had not been created. Most of the researches were based on hypotheses and physical or statistical models built for specific conditions of experiments realizations. The amplitude-frequency range of periodic impact was determined for further researches.

Section 2 provided a selection of main components of surfacing installation, calculations concerning selection of oscillations generation elements: stepper motor, its driver, control unit; information about welding materials, researches methods that were used during the dissertation work.

Section 3 provided analytical calculations on relationship between values welding travel speed, welding current, value of period time short-circuiting transfers mode and oscillation parameters. The influence of oscillations on arc stability, spatter value of electrode wire and power consumption of arc was analyzed.

Section 4 presented investigation results of deposited metal hardness and *HAZ* of base metal, geometric dimensions of weld beads obtained under oscillations conditions of the described type. The hardness and height values of weld beads were researched on the basis of regression models built according to the plan of experiments by "*Latin square*" method. Investigation of welded beads width was carried out on the basis of the analytical model obtained as a solution of equations system of the forced oscillations of harmonic oscillator and the rotational motion dynamics of oscillating system. Based on model's analysis, the surfacing weld technological mode for obtaining a weld bead with optimal values of hardness and geometric dimensions is determined.

Section 5 presented results of metal microstructure analysis of weld beads obtained according to experiments plan by the "*Latin square*" method. The main microstructure structural components of deposited metal and *HAZ* of base metal were established and the main differences in microstructure of these weld beads compared to the weld beads obtained without oscillations influence were established as well. The crystallite size analysis depended on oscillations parameters and surfacing weld mode parameters was also given. The analysis was based on the regression model built by the same conditions as the previous models, which specified in Section 4. The relationship between values of deposited metal hardness and the crystallite size is established. The implementation of researches results on modification of technology of support plates of hydraulic presses surfaces restore were used in printing production for crimping book blocks, brochures, posters and other printing products, is presented.

Keywords: surfacing weld, oscillations specimen to be surfacing, crystallite size, width of weld bead, height of weld bead, hardness of deposited metal, amplitude of welding pool oscillations, frequency of welding pool oscillations.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА:

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. **Novykov S.** Investigation of the influence of low-frequency harmonic oscillations on deposited metal. *Kovove Mater.* 2022. No 5 (60), P. 315-326.
(Журнал входить до міжнародних наукометричних баз даних WoS; SCOPUS, Q3)

<https://doi.org/10.31577/km.2022.5.315>

2. Lebedev V. O., **Novykov S. V.** Influence of Weld Pool Low-Frequency Oscillations on the Formation of Crystallites' Size and Welded Metal Microstructure. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2022. No 3 (44), P. 419-430.

(Журнал входить до міжнародної наукометричної бази даних SCOPUS, Q3)

<https://doi.org/10.15407/mfint.44.03.0419>

3. Лебедев В., **Новиков С.** Колебатель изделия для автоматической дуговой наплавки. *Технічні науки та технології.* 2020. № 2 (20), С. 11-21.

(Журнал включено до переліку наукових фахових видань МОН)

[https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-2\(20\)-11-21](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-2(20)-11-21)

4. Lebedev V. A., Solomiichuk T. G., **Novykov S. V.** Study of a welding pool harmonic oscillations influence on the welded metal hardness and weld bead width. *Journal of engineering sciences.* 2019. № 1 (6), C17-C21.

(Журнал включено до переліку наукових фахових видань МОН)

[https://doi.org/10.21272/jes.2019.6\(1\).c4](https://doi.org/10.21272/jes.2019.6(1).c4)

5. Лебедев В. А., Драган С. В., Жук Г. В., **Новиков С. В.**, Симутенков И. В. Применение импульсных воздействий при дуговой сварке плавящимся электродом в среде защитных газов (Обзор). *Автоматичне зварювання.* 2019. № 8, С. 30-40.

(Журнал включено до переліку наукових фахових видань МОН)

<https://doi.org/10.15407/as2019.08.04>

Lebedev V. A., Dragan S.V., Zhuk G.V., **Novikov S.V.**, Simutenkov I.V.
Application of pulsed impact in consumable electrode gas-shielded arc welding
(Review). *TPWJ*. 2019. № 8, P. 18-26.

(Журнал включено до переліку наукових фахових видань МОН)

<https://doi.org/10.15407/tpwj2019.08.04>

6. Лебедев В. А., **Новиков С. В.**, Соломийчук Т. Г. Определение твердости наплавленного металла и металла зоны термического влияния (ЗТВ) при низкочастотных колебаниях сварочной ванны. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2019. № 2, С. 54-61.

(Журнал включено до переліку наукових фахових видань МОН)

<https://doi.org/10.15588/1607-6885-2019-2-9>

7. Лебедев В. А., **Новиков С. В.**, Драган С. В., Симутенков И. В. Математическая модель процессов сварки и наплавки с управляемыми изменениями вылета электродной проволоки. *Збірник наукових праць НУК*. 2017. №1, С. 48-54.

(Журнал включено до переліку наукових фахових видань МОН)

<https://doi.org/10.15589/jnn20170108>

8. Лебедев В. А., Драган С. В., **Новиков С. В.**, Симутенков И. В. Управление формированием структуры шва при воздействии низкочастотными механическими колебаниями на расплав сварочной ванны (обзор). *Збірник наукових праць НУК*. 2017. №3, С. 21-28.

(Журнал включено до переліку наукових фахових видань МОН)

<https://doi.org/10.15589/jnn20170303>

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

1. Лебедев В., **Новиков С.** Аналіз впливу низькочастотних коливань зварювальної ванни на частоту перенесення електродного металлу. *Міцність і довговічність сучасних матеріалів та конструкцій: праці Міжнар. наук-техн.*

конф., м. Тернопіль, 10-11 листопада 2022 р. / Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., Тернопіль, 2022. С. 122-124. (*Форма участі – заочна*)

2. Лебедев В. О., **Новиков С. В.** Практичне застосування електродугового автоматичного наплавлення з керованими коливаннями виробу. *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку*: матеріали XX міжнар. наук-техн. конф., Краматорськ-Тернопіль, 01-03 вересня 2022 р. / ДДМА, Краматорськ, 2022. С.132-133. (*Форма участі – заочна*)

3. Лебедев В. О., **Новиков С. В.** Установка для наплавления та зварювання в середовищі CO₂ з механічними поперечними гармонічними коливаннями зварювальної ванни. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем*: матеріали XII міжнар. наук-практ. конф. Т.2, м. Чернігів, 26-27 травня 2022 р. / Національний університет «Чернігівська політехніка» [та ін.], Чернігів, 2022. С.42-43. (*Форма участі – заочна*)

4. **Новиков С. В.** Дугове наплавлення у вуглекислому газі з використанням механічних низькочастотних гармонійних коливань зварювальної ванни. Доповідь. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем*: матеріали XI Міжнар. наук-практ. конф., м. Чернігів, 26-27 травня 2021 р. / *Витяг з протоколу пленарного засідання №2 для доповідей за закінченими дисертаційними роботами.* (*Форма участі – очна*)

5. Лебедев В. А., **Новиков С. В.** Моделирование величин твёрдости наплавленного металла и металла ЗТВ при низкочастотных колебаниях сварочной ванны. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем*: матеріали X Міжнар. наук-практ. конф., Т.3, м. Чернігів, 23-25 вересня 2020 р. / Національний університет «Чернігівська політехніка» [та ін.], Чернігів, 2020. С.37-38. (*Форма участі – заочна*)

6. Лебедев В. А., **Новиков С. В.**, Халимовский А. М. Влияние параметров колебаний сварочной ванны на частоту переноса электродного металла. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем*: матеріали X Міжнар. наук-практ. конф., Т.2, м. Чернігів, 29-30 квітня 2020 р. / Національний

університет «Чернігівська політехніка» [та ін.], Чернігів, 2020. С.43-44.
(Форма участі – заочна)

7. Лебедев В. А., **Новиков С. В.**, Соломийчук Т. Г. Влияние гармонических колебаний сварочной ванны частотой до 5 Гц на величину зерна металла наплавленного. *Modern Questions of Production and Repair in Industry and in Transport: materials of the 19th International Scientific and Technical Seminar, Kosice, 18-23 February 2019* / Асоціація технологів-машинобудівників України, Київ, 2019. Р. 102-105. (Форма участі – заочна)

8. Lebedev V., **Novykov S.** Analytical determination of increasing the surfacing bead width in depend on the amplitude-frequency characteristics of the welded bath vibration. *Modern Questions of Production and Repair in Industry and in Transport: materials of the 18th International Scientific and Technical Seminar, Brno, 10-16 February 2018* / Асоціація технологів-машинобудівників України, Київ, 2018. Р. 165-169. (Форма участі – заочна)

9. Лебедев В. А., **Новиков С. В.** Расчёт скорости наплавки в условиях аддитивных колебаний сварочного инструмента и ванны. *Перспективна техніка і технології – 2017: матеріали XIII Міжнар. наук-практ. конф. молодих учених, аспірантів і студентів, м. Миколаїв, 27-29 вересня 2017 р.* / М-во освіти і науки України, Миколаїв. нац. аграрний ун-т, Миколаїв, 2017. С.53-61.
(Форма участі – заочна)

10. Лебедев В. А., **Новиков С. В.** Разработка методов снижения степени разбрызгивания металла при наплавке в среде углекислого газа с поперечными колебаниями сварочной ванны. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали VIII міжнар. наук – техн. конф., м. Миколаїв, 11-13 жовтня 2017 р.* / Нац. ун-т. кораблебуд. ім. адмірала Макарова, Миколаїв, 2017. С.160-162.
(Форма участі – заочна)

11. Лебедев В. А., **Новиков С. В.**, Жук Г. В. Расчёт скорости наплавки в условиях аддитивного воздействия колебания сварочного инструмента и вибрации сварочной ванны. *Вібрації в техніці та технологіях: збірник тез та доповідей XVI*

Міжнар. наук – техн. конф., м. Вінниця, 26-28 жовтня 2017 р. / ВНТУ, Вінниця, 2017. С.81-84. (Форма участі – заочна)

12. Lebedev V., **Novykov S.** Energy and resource saving at arc welding with a controlled oscillation of welding pool. *9th International Conference of Young Scientists on Welding and Related Technologies: proceedings*, Kyiv, 23-26 May 2017 / DIA Ltd., Kyiv, 2017. P. 81-83. (Форма участі – очна)

13. Лебедев В. А., **Новиков С. В.** Аналитическое определение скорости наплавки в условиях внешних механических колебаний сварочной ванны и инструмента. *Инженерия поверхности и реновация изделий*: матер. 17 – ї Міжнар. наук – техн. конф., Одеса-Київ, 29 травня-02 червня 2017 р. / Асоціація технологів-машинобудівників України, Київ, 2017. С.252-254. (Форма участі – очна)

14. Лебедев В. А., **Новиков С. В.** Анализ управления формированием наплавленной структуры металла шва за счёт механического воздействия на сварочную ванну и сварочный инструмент. *Сварка и родственные технологии: перспективы развития*: матер. 17 – ї Міжнар. IV наук – техн. конф., м. Краматорськ, 04-08 жовтня 2016 р. / ДДМА, Краматорськ, 2016. С.90-92. (Форма участі – заочна)

15. Лебедев В. О., Драган С. В., Галь А. Ф., Сімутенков І. В., **Новиков С. В.** Спосіб забезпечення суцільності шару, наплавленого електродуговим зварюванням по гвинтовій лінії. Патент України на корисну модель № 113943. Бюлетень винаходу. №4. Дата публікації 27.02.17.

16. Лебедев В. О., Драган С. В., Галь А. Ф., Сімутенков І. В., **Новиков С. В.** Спосіб електродугового наплавлення з керуванням формою поверхні валика. Патент України на корисну модель № 120877. Бюлетень винаходу. №22. Дата публікації 27.11.17.

17. Лебедев В. О., Драган С. В., Галь А. Ф., Сімутенков І. В., **Новиков С. В.** Установка для автоматического дугового наплавления внешних поверхностей деталей обертання. Патент України на корисну модель № 112270. Бюлетень винаходу. №23. Дата публікації 12.12.16.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	20
ВСТУП.....	27
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ТЕХНОЛОГІЧНОГО КЕРУВАННЯ СТРУКТУРОЮ ТА ВЛАСТИВОСТЯМИ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ПРИ ЗОВНІШНЬОМУ ВПЛИВІ НА ЗВАРЮВАЛЬНУ ВАННУ ТА ПРОЦЕС КРИСТАЛІЗАЦІЇ МЕТАЛУ ШВУ АБО НАПАЛВЛЕНОГО МЕТАЛУ	33
1.1 Загальні положення та теоретичне обґрунтування експериментальних даних.....	34
1.2 Основні методи та технологічні прийоми, що сприяють підвищенню якості наплавленого металу.....	44
1.3 Висновки до 1-го розділу.....	60
РОЗДІЛ 2. ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИКИ ДЛЯ ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	65
2.1 Вибір джерела живлення та пристрою подавання електродного дроту.....	67
2.2 Опис конструкції станини.....	68
2.3 Вибір крокового двигуна та опис системи його керування.....	71
2.4 Підготовка зварювальних матеріалів та зразків.....	78
2.5 Налаштування параметрів наплавлення та вимірювання електричних параметрів дуги.....	80
2.6 Порядок проведення наплавлень.....	82
2.7 Методика визначення ступеню розбризкування.....	83
2.8 Методика виявлення границь зерен та мікроструктури наплавленого металу.....	83
2.9 Методики вимірювання величин розміру кристаліта, твердості, геометричних розмірів наплавлених валиків.....	84

2.10	Висновки до 2-го розділу	86
РОЗДІЛ 3. ВПЛИВ КОЛИВАНЬ ЗВАРЮВАЛЬНОЇ ВАННИ НА ОСНОВНІ ПАРАМЕТРИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ.....		
88		
3.1	Зв'язок амплітудно – частотних характеристик з швидкістю наплавлення	88
3.2	Вплив коливань на характер переносу електродного металу.....	95
3.3	Вплив погрішності виміру струму наплавлення.....	107
3.4	Вплив коливань на стабільність горіння та тепловміст дуги, ступінь розбризкування електродного металу.....	108
3.5	Визначення ступеню впливу коливань на силу струму наплавлення.....	111
3.6	Висновки до 3-го розділу	115
РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЧНОГО РЕЖИМУ НАПЛАВЛЕННЯ В УМОВАХ ПРИМУСОВИХ ПОПЕРЕЧНИХ КОЛИВАНЬ ЗВАРЮВАЛЬНОЇ ВАННИ НА ГЕОМЕТРИЧНІ РОЗМІРИ ВАЛИКА ТА ВЛАСТИВОСТІ ЗВАРНОГО З'ЄДНАННЯ «ОСНОВНИЙ-НАПЛАВЛЕНИЙ МЕТАЛ».....		
118		
4.1	Підготовка експериментальної бази.....	118
4.2	Побудова регресійних моделей щодо визначення твердості наплавленого металу, металу ЗТВ, висоти наплавленого валику, середнього умовного діаметру зерна наплавленого металу та визначення основних параметрів їх достовірності.....	130
4.3	Аналіз впливу факторів на твердість наплавленого металу, металу ЗТВ та геометричні розміри наплавленого валику	134
4.4	Визначення оптимального режиму наплавлення з коливаннями зварювальної ванни	149

4.5	Наплавлення на оптимальному режимі наплавлення з коливаннями зварювальної ванни зварювальним дротом марки Нп-30ХГСА.....	150
4.6	Висновки до 4-го розділу	153
РОЗДІЛ 5. ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОСТРУКТУРИ НАПЛАВЛЕНОГО МЕТАЛУ І МЕТАЛУ ЗТВ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ СПОСОБУ МОДИФІКУВАННЯ НАПЛАВЛЕНОГО МЕТАЛУ МЕТОДОМ КОЛИВАНЬ ДЕТАЛІ, ЩО НАПЛАВЛЯЄТЬСЯ.....		
5.1	Вплив коливань зварювальної ванни на розмір кристаліту наплавленого металу.....	158
5.2	Щодо впливу розміру кристаліту на значення твердості наплавленого металу.....	162
5.3	Вплив коливань на формування структурних складових наплавленого металу та ЗТВ.....	166
5.4	Модифікування мікроструктури наплавленого металу під впливом коливань даного типу.....	178
5.5	Впровадження результатів досліджень.....	179
5.6	Висновки до 5-го розділу	184
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....		188
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....		191
ДОДАТКИ.....		204

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

$EMЗ$	–	електромагнітне збурення
$ЗТВ$	–	зона термічного впливу
$ДВЗ$	–	ділянка великого зерна мікроструктури
$ДДЗ$	–	ділянка дрібного зерна мікроструктури
$ДНП$	–	ділянка неповної перекристалізації
imp	–	кількість імпульсів повороту валу крокового двигуна за такт
$time$	–	час між імпульсами повороту валу крокового двигуна
M	–	значення складової механічного моменту у різні проміжки часу коливань
M_{δ}	–	динамічний момент коливальної системи
M_{mp}	–	значення складової механічного моменту сили тертя кочення у підшипниках
$M_{\delta max}$	–	максимальне значення механічного моменту на валу крокового двигуна в довільний момент часу
M_0	–	максимальне значення механічного моменту на валу крокового двигуна за час півперіоду
M_{I_n}, M_U	–	середнє значення сукупності вимірів струму наплавлення та напруги на дузі відповідно
$M \left[\tilde{\beta} \right]$	–	математичне сподівання оцінки вектору параметрів регресії $\tilde{\beta}$
J	–	момент інерції коливальної системи
ω	–	кутова швидкість
t	–	координата часу
t_0	–	початковий момент часу
t_{δ}	–	час горіння дуги між короткими замкненнями
t_n	–	час наплавлення

$t_{\text{окр}}$ –	час відриву краплі у певний момент часу до моменту короткого замкнення
t_n –	час періоду коливань
m –	маса коливальної системи
$m_{\text{зв}}$ –	маса розплаву зварювальної ванни
y –	координата вертикального переміщення
y_i –	дійсне (вимірне) значення величини твердості наплавленого металу, металу ЗТВ, висоти наплавленого валику, розміру кристаліту
\tilde{y} –	значення величини твердості наплавленого металу, металу ЗТВ, висоти наплавленого валику, розміру кристаліту, що розраховане за рівнянням множинної регресії
Y –	відгук регресійного поліному
x –	координата горизонтального переміщення
A –	амплітуда вимушених коливань виробу, що наплавляється
L –	розмах коливань
ν –	частота вимушених коливань виробу, що наплавляється
l_k –	відстань від центра мас розплаву зварювальної ванни до осі коливань
l –	довжина нормалі до траєкторії руху зварювальної ванни в умовах коливань зварювального виробу
l_{∂} –	довжина дугового проміжку
$l_{\partial 0}$ –	довжина дугового проміжку у початковий момент часу
φ_0 –	початкова фаза вимушених коливань зразка, що наплавляється
φ_i –	функція, що являє собою комбінацію незалежних факторів та їх ступенів у регресійному поліномі
μ –	коефіцієнт тертя
D_n –	зовнішній діаметр підшипника

$U_{ст}$ –	напруга, що подається на обмотки статору крокового двигуна
$U_{жд}$ –	напруга живлення драйверу крокового двигуна
$U_{джер}$ –	вихідна напруга джерела живлення крокового двигуна
U_{δ} –	електрична напруга зварювальної дуги
$U(t)$ –	середнє значення напруги на дузі за певний проміжок часу наплавлення
$L_{кд}$ –	індуктивність обмотки статору крокового двигуна
$I_{кд\phi}$ –	величина фазової сили струму крокового двигуна
$I_{джер}$ –	вихідна величина сили струму джерела живлення крокового двигуна
$I_{др}$ –	вихідна величина сили струму драйверу крокового двигуна
I_n –	сила струму наплавлення
I_{max}^n –	пікове значення сили струму наплавлення
I_{min}^n –	мінімальне значення сили струму наплавлення
$i(t)$ –	середнє значення струму за певний проміжок часу наплавлення
V_n –	швидкість наплавлення
$V_{поч}$ –	початкова швидкість наплавлення
V_n^n –	складова швидкості наплавлення у поперечному напрямку
V_n –	швидкість подавання електродного дроту
V_e –	швидкість плавлення електроду
V_{ey} –	швидкість плавлення електроду, що встановилася після досягнення номінальної сили струму наплавлення
V_{max} –	швидкість плавлення електроду, що відповідає піковому значенню сили струму наплавлення
V_l –	швидкість зміни довжини дугового проміжку
V_0 –	значення швидкості зміни довжини дугового проміжку у початковий момент
V –	об'єм сфери

η –	ефективний КПД нагрівання зварювальною дугою
λ –	коефіцієнт теплопровідності
T_n –	початкова температура металу
$T_{пл}$ –	температура плавлення металу
$T_{зл}$ –	постійна часу зварювального ланцюга
α_p –	коефіцієнт розплавлення металу
a_n –	кутовий коефіцієнт нормалі до дотичної у певній точці графіка функції
α –	кут відхилену деталі, що наплавляється від вертикалі
d_e –	діаметр електродного дроту
ρ –	щільність металу електродного дроту
$\rho_{рм}$ –	густина сталі у рідкому стані
Ψ –	ступінь розбризкування металу електродного дроту
$P_{пластини}$ –	вага зразка до наплавлення
$P1_{наплавлення}$ –	вага зразка після наплавлення
$P2_{наплавлення}$,	
$P_{решт}$ –	вага зразка після очищення від металевих решток, що опинились на поверхні деталі та валику після наплавлення
$P_{дроту}$ –	вага електродного дроту, що задіяно для наплавлення одного валика
b_A, b_B –	вільний член у рівнянні прямої
b –	висота наплавленого валику
b_{min} –	висота наплавленого валику найменшого розміру без впливу коливань
$b_{min}^{кол}$ –	висота наплавленого валику найменшого розміру під впливом коливань
k –	будь-яке натуральне число
k_{V_H} –	коефіцієнт пропорційності між швидкістю наплавлення і параметрами коливань

n	–	параметр, що визначає ступінь суцільності валика
h	–	відстань від центру мас розплаву зварювальної ванни до міжфазної границі
$c \cdot \phi$	–	об'ємна теплоємність
$C_V^{U_d}, C_V^{I_n}$	–	коефіцієнти варіації, віднесені до частоти коротких замкнень по напрузі дуги і сили струму наплавлення відповідно
$f_{кз}$	–	частота коротких замкнень при перенесенні електродного металу у зварювальну ванну
p	–	кількість вимірів напруги на дузі або струму наплавлення відповідно у вибірці
Q_Σ	–	кількості електричної енергії в дуговому проміжку за час певний час наплавлення
E	–	напруженість електричного поля електричної дуги
ε_0	–	електромагнітна проникність
r	–	радіус стовпа дуги
U_i	–	потенціал іонізації дугової плазми
g_e	–	перетин Рамзауєра
χ	–	відношення статистичної ваги одноразово заряджених іонів до статистичної ваги атому
G	–	постійна, що враховує характеристики плазми, які є постійними
D	–	коефіцієнт, обумовлений розмірністю
Z	–	коефіцієнт силою струму наплавлення і швидкістю наплавлення, що визначається критерієм зберігання геометричної подоби зварювальної ванни
g_n	–	питома енергія процесу наплавлення
β_i	–	параметр регресії у регресійному поліномі
$\tilde{\beta}$	–	оцінка вектору параметрів регресії
β	–	коефіцієнт в'язкості металу розплаву

Q –	квадрат різниці між дійсним (вимірним) значенням залежної величини у та її значенням, розрахованим за рівнянням регресії
ε –	модуль вектору (нев'язки) випадкових помилок
e_i –	величина залишку між вимірними та розрахованими величинами
ξ –	величина стандартизованих залишків
S –	оцінка стандартного відхилення помилок експериментів у функції прогнозу значення \tilde{y}_i
R^2 –	коефіцієнт детермінації
\bar{R}^2 –	наведений (скорегований) коефіцієнт детермінації
H –	твердість наплавленого металу
H_{max} –	максимальне значення твердості наплавленого металу без впливу коливань
H_{max}^{COL} –	максимальне значення твердості наплавленого металу з коливальним впливом
H_{cp} –	середньо-арифметичне значення твердості наплавленого металу по зонам перетину
$H_{ЗТВ}$ –	твердість металу ЗТВ
$H_{ЗТВmax}$ –	максимальне значення твердості металу ЗТВ без впливу коливань
$H_{ЗТВmax}^{COL}$ –	максимальне значення твердості металу ЗТВ з коливальним впливом
δ –	середній умовний діаметр зерна
δ_{cp} –	середньо-арифметичне значення середнього умовного діаметра зерна
$\delta_{cp}^{\delta/k}$ –	середнє значення умовного діаметру зерна наплавленого металу валиків, отриманих за відсутністю коливань

$\delta_{CP}^{КОЛ}$ –	середнє значення умовного діаметру зерна наплавленого металу валиків, отриманих з коливаннями
W –	ширина наплавленого валику
$W_{роз}$ –	розраховане значення ширини наплавленого валику
$W_{вим}$ –	вимірне значення ширини наплавленого валику
F –	механічна сила
F_0 –	амплітуда примушуючої сили
$2 \cdot \gamma$ –	коефіцієнт, що характеризує силу в'язкого тертя
ω_0^2 –	частота власних коливань розплаву
Θ –	кут між вектором примушуючої сили та напрямом зміни координати $x(t)$
Δ –	відносна похибка між розрахованими та вимірними значеннями ширини наплавленого валику

ВСТУП

Актуальність теми. Процеси наплавлення та зварювання широко використовуються як для підвищення експлуатаційних характеристик робочих поверхонь деталей та інструментів, так і для з'єднання елементів металевих конструкцій. За реалізацією цих технологічних процесів широко використовується дуговий метод формування зварювальної ванни на поверхні деталі при її наплавленні або в зоні з'єднання при зварюванні. В попередніх дослідженнях показано, що службові властивості наплавленого металу залежать не лише від його хімічного складу, але й характеристик мікроструктури. Останні в значній мірі визначаються режимами дугового процесу і механічними коливаннями зварювальної ванни відносно дуги. Таким чином, встановлення взаємозв'язку між технологічними параметрами формування зварювальної ванни і характеристиками наплавленого металу залишається актуальним.

Суттєвий вплив періодичної дії механічних коливань на мікроструктуру металу, що кристалізується, відомий ще з 19 століття, але значно розширити сферу знань в цій області вдалося у 20 столітті. В минулі роки в галузі зварювальних технологій із застосуванням періодичного впливу механічних коливань значних результатів досягли такі вчені, як-от: С.В. Арістов, В.Л. Руссо, Г.А. Славін, А.М. Болдирєв, К. Wittke та інші. На сьогоднішній день це роботи: І.О. Рябцева, В.О. Лебедєва, С.В. Драгана, Ч.В. Пульки, Н.В. Спірідонової, Selvi, Singh, Gill, Hsieh та інші.

З літературних джерел відомо, що дослідження впливу механічних коливань на структуру наплавленого металу проводили за частоти коливань зварювальної ванни більшої ніж 10,0 Гц, а амплітуда коливань, при цьому, знаходилася в діапазоні від 40,0 мкм до 2,0 мм. Проте, показано, що вплив на мікроструктуру наплавленого металу проявляється вже за частоти коливань дуги в околі від 1,0 Гц до 1,5 Гц. Враховуючи те, що коливання дуги можуть бути реалізовані не лише переміщенням електроду відносно зварювальної ванни, а й за рахунок її переміщення відносно електроду, зменшення частоти коливання дозволяє

реалізувати інший підхід до процесів наплавлення та зварювання, а саме, за рахунок коливання поверхні деталі відносно дуги. Встановлення взаємозв'язку між параметрами механічних коливань, дугового процесу та характеристиками наплавленого металу є необхідним для оптимізації технологічних процесів, пов'язаних з наплавленням та зварюванням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Наукова робота виконувалась в період з 2015 по 2021 р.р. в Інституті електрозварювання ім. Є.О Патона Національної академії наук України на технологічній базі Державного підприємства “Дослідне конструкторсько-технологічне бюро Інституту електрозварювання ім. Є.О Патона Національної академії наук України” (ДП “ДКТБ ІЕЗ ім. Є.О Патона НАНУ”) в рамках плану науково-дослідних робіт за темою державної програми «Дослідження закономірностей та фізико-технічних особливостей дугового зварювання плавким електродом в імпульсному режимі конструкцій відповідального призначення в усіх просторових положеннях, в тому числі під водою. 2017-2021 р.р.» (номер держреєстрації 0117U001219); восьмої рамочної програми Європейського Союзу по розвитку наукових досліджень і технологій «*Horizon 2020*» «*Integration of advanced experiments, computation and data for Duplex Stainless Steel joining innovation*» (№ 823786 – i – Weld).

Метою роботи є підвищення властивостей відновленого поверхневого шару опорних плит гідравлічного пресу дуговим наплавленням з використанням механічних низькочастотних коливань поверхні деталі обраного типу, встановлення закономірностей впливу цих коливань та режимів наплавлення на структуру та властивості наплавленого металу та металу зони термічного впливу.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі основні **задачі**:

1. Створити установку для наплавлення з коливаннями означеного типу виробу, що наплавляється.
2. Розробити аналітичні моделі, що встановлюють зв'язок параметрів коливань з основними параметрами режиму наплавлення за умов задовільного

формування наплавленого металу у випадку накладання обраного виду коливань виробу.

3. Розробити числові моделі, що встановлюють зв'язок параметрів коливань та основних параметрів режиму наплавлення з характеристиками мікроструктури наплавленого металу та металу ЗТВ, службовими властивостями наплавленого металу та геометричними розмірами валиків.
4. Дослідити вплив коливань на величину періоду горіння дуги, стабільність та енергоємність дуги.
5. Дослідити вплив коливань на мікроструктуру наплавленого металу та металу ЗТВ.

Об'єкт дослідження є комплекс властивостей наплавленого металу: твердість, мікроструктура, геометричні розміри наплавленого валику, процес перенесення електродного металу.

Предмет дослідження є наплавлений метал, отриманий з використанням механічних низькочастотних гармонійних коливань зазначеного типу поверхні зразка, що наплавляється.

Методи дослідження. Віккерса – визначення твердості наплавленого металу і металу ЗТВ; травлення – визначення границі дійсного зерна мікроструктури; оптичної та растрової мікроскопії – визначення загального виду мікроструктури та типу її структурних складових, висоти валиків; підрахунку перетину границь зерен – визначення розміру кристаліту (діаметр зерна); ступеню розбризування – встановлення ступеню розбризування металу електродного дроту; статистичного аналізу осцилограм – встановлення дійсного значення струму наплавлення і напруги на дузі; кількісної оцінки тепловмісту дуги – визначення кількості електричної енергії, витраченої на горіння дуги певної тривалості; “латинського квадрату” – визначення кількості наплавлень в серії експериментів; найменших квадратів регресійного аналізу – визначення параметрів регресії; визначення середніх значень відгуку – встановлення оцінки ступеню впливу технологічних факторів.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше досліджено можливості модифікування низьколегованого наплавленого металу адитивною дією механічних низькочастотних коливань, що здійснюються у вертикальній та горизонтальній площинах та практично реалізується періодичним рухом зварювального виробу за траєкторією дуги окружності з частотою за діапазоном від 2,5 Гц до 4,5 Гц та з амплітудою від 3,0 мм до 7,0 мм.
2. Вперше встановлено, що модифікування поверхневого шару деталі, що наплавляється дуговим наплавленням під дією механічних коливань означеного типу за частоти 2,5 Гц, амплітуди 7,0 мм, забезпечує максимальне збільшення твердості наплавленого металу відносно наплавлення без коливального впливу, що обумовлено як диспергуванням мікроструктури, так і формуванням в ній зерен із структурними складовими з високою твердістю: голчастого та пластинчатого фериту, сорбітоподібного перліту та бейніту.
3. Доведена можливість збільшення ширини наплавлених валиків від 1,3 рази до 1,8 рази, зменшення їх висоти – від 1,2 рази до 6,4 рази та глибини проплавлення основного металу у 2,0 рази у порівнянні з наплавленням без коливань, що обумовлено розосередженням розплаву зварювальної ванни на значну площу основного металу.

Практичне значення отриманих результатів. Створено установку для наплавлення плоских деталей з функцією їх коливань за напрямком дуги окружності, що обумовлює підвищену твердість наплавленого металу та формування валиків з ефективними геометричними розмірами. Розроблено технологічні рекомендації щодо наплавлення на плоскі поверхні деталей з вуглецевих сталей типу Ст3сп економно-легованим дротом на основі отриманих статистичних та аналітичних залежностей, достовірність яких перевірено при відновлювальному наплавленні робочих поверхонь опорних плит гідравлічного пресу, що використовуються у поліграфічному виробництві для обтискання книжних блоків, брошур, постерів та інших поліграфічних виробів. Даний спосіб

наплавлення було реалізовано на підприємстві Видавничий Дім «Фоліант» м. Київ, що підтверджується відповідним актом впровадження.

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота є результатом експериментальних і теоретичних досліджень, проведених як особисто автором, так і за його безпосередньої участі. Постановка задач та аналіз отриманих результатів здійснювались спільно з науковим керівником та співавторами публікацій. При проведенні досліджень, результати яких опубліковано у співавторстві, автору належить: проведення циклу аналітичних [1], [4], [5], [7], [23]-[25], [27]-[29] та теоретичних [2], [3], [10], [16], [26], [30] досліджень, отримання експериментальної бази даних, статистична обробка результатів [8], [13], [18], [20], [21], розробка аналітичних і регресійних моделей та їх верифікація [6], [15], [19], [22], дослідження службових характеристик, мікроструктури і геометричних розмірів валиків [9], [11], [14], створення установки для наплавлення та пристрою генерації коливань [12], [17]: розробка алгоритму керування, структури меню блока керування, вибір вихідних даних крокового двигуна. Результати аналітичних, експериментальних і теоретичних досліджень лягли в основу створення устаткування і технології наплавлення тіл обертання з періодичним впливом на розплав зварювальної ванни механічним способом [31]-[33].

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати роботи доповідалися та обговорювалися на: IV міжнародній науково – технічній конференції «Сварка и родственные технологии: перспективы развития», (Краматорськ, 2016 р.), 17-й Міжнародній науково – технічній конференції «Инженерия поверхности и реновация изделий» (Одеса – Київ, 2017), XVI Міжнародній науково – технічній конференції «Вібрації в техніці та технологіях» (Вінниця, 2017), VIII Міжнародній науково – технічній конференції «Інновації у суднобудуванні та океанотехніці» (Миколаїв, 2017), XIII Міжнародній науково – практичній конференції молодих вчених, аспірантів і студентів «Перспективна техніка і технології – 2017» (Миколаїв, 2017), *9th International Conference of Young Scientists on Welding and Related Technologies* (Київ, 2017), *18th International*

Scientific and Technical Seminar: Modern Questions of Production and Repair in Industry and in Transport (Брно, Чехія, 2018), *19th International Scientific and Technical Seminar: Modern Questions of Production and Repair in Industry and in Transport* (Кошице, Словаччина, 2019), X міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (Чернігів, 2020 р.), XI міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (Чернігів, 2021 р.), XII міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (Чернігів, 2022 р.), XX міжнародній науково-технічній конференції «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку» (Краматорськ-Тернопіль, 2022 р.), міжнародній науково-технічній конференції «Міцність і довговічність сучасних матеріалів та конструкцій» (Тернопіль, 2022 р.).

Публікації. Результати досліджень за темою дисертації опубліковано у 14 наукових працях, з яких 2 включені до міжнародних наукометричних баз даних *SCOPUS* та *WoS*; 16 тез і матеріалів міжнародних науково-технічних та науково-практичних конференцій та семінарів; оформлено 3 патенти України на корисну модель.

Структура й об'єм роботи. Дисертаційна робота складається із вступу і п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний об'єм дисертації – 190 сторінок машинописного тексту, включаючи 18 таблиць, 54 рисунки і список використаних джерел з 123 найменувань вітчизняних і зарубіжних авторів.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ТЕХНОЛОГІЧНОГО КЕРУВАННЯ СТРУКТУРОЮ ТА ВЛАСТИВОСТЯМИ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ПРИ ЗОВНІШНЬОМУ ВПЛИВІ НА ЗВАРЮВАЛЬНУ ВАННУ ТА ПРОЦЕС КРИСТАЛІЗАЦІЇ МЕТАЛУ ШВУ АБО НАПЛАВЛЕНОГО МЕТАЛУ

Ідеї з управління кристалізацією з метою отримання дрібнозернистої структури висувалися ще з другої половини 19 ст. Д.К. Черновим (рос.) [1]. Як показує досвід, дрібнозерниста структура литого металу шву дозволяє поліпшити механічні властивості зварного шву, тим самим підвищивши його технологічну міцність, корозійну стійкість і надійність. За класифікацією В.П. Морозова (рос.) [2], формування дрібнозернистої структури можливе методами: раціонального вибору матеріалів, механічної поверхневої обробки металу перед зварювальними роботами, використання модифікаторів, застосування відомої теорії міцності [3] при виборі технологічних режимів зварювальних процесів, застосування періодичного впливу на розплав зварювальної ванни. Кожен з цих методів має свої недоліки і переваги, однак, саме керований періодичний вплив дає змогу ефективно регулювати такий основний чинник кристалізації, як її швидкість, що досить повно осягнене в роботах А.М. Болдырева (рос.) та ін. [4], Б. Чалмерса (рос.) [5], В.А. Тиллера (рос.) [6].

Складність металургійних явищ в процесі нерівноважної кристалізації в умовах зовнішнього періодичного впливу обумовлена багатьма факторами, що не дозволило на сьогоднішній день розробити теорію, яка описує формування мікроструктури наплавленого металу за таких умов. Однак, існують ґрунтовні гіпотези щодо цього опису, засновані на глибокому теоретичному аналізі, які необхідно розглянути.

1.1. Загальні положення та теоретичне обґрунтування експериментальних даних

На сьогоднішній день за ключовим критерієм отримання дрібнозернистої структури з накладенням зовнішніх коливань всі існуючі гіпотези можна класифікувати за трьома наступними типами:

- забезпечення умов концентраційного переохолодження в розплаві для отримання гомогенних центрів кристалізації;
- плавлення кристалітів, що вже кристалізувалися, для потрапляння тугоплавких частинок в розплав хвостової частини зварювальної ванни, що зумовить отримання нових центрів кристалізації;
- забезпечення механічного перемішування гарячих і холодних шарів розплаву зварювальної ванни, що має забезпечити термічне переохолодження.

Як зазначає А.М. Болдырев (рос.) у своїй роботі [7], до найбільш ефективних способів подрібнення структури металу шва належить впровадження коливань в зварювальну ванну або низької (від 1,0 Гц до 100,0 Гц), або ультразвукової частоти. Механізм формування структури шва при низькочастотних коливаннях, як зазначає автор, пояснений суперечливо і не має єдиної думки. У роботі відзначено, що наявне в літературі трактування факту подрібнення зерна при накладених коливаннях зводиться до двох основних гіпотез.

Перша гіпотеза стверджує, що коливання, введені в зварювальну ванну, обумовлюють гомогенне утворення нових центрів кристалізації. Фізично це пояснюється утворенням стрибків тиску в рідкій фазі, що, відповідно до принципу Ле Шательє, призводить до зростання рівноважної температури кристалізації і, як наслідок, до появи динамічного переохолодження металу. Б. Чалмерс (рос.) [5] та *H.J. Seeman* та ін. [8] теоретично і експериментально доводять правомірність цієї гіпотези, але тільки в разі накладення на метал зварювальної ванни коливань ультразвукової частоти.

Друга гіпотеза пояснює руйнування зростаючих кристалів, як результат впливу сил тертя, що виникають між рухомою рідкою фазою і поверхнею кристала. *G. Schmid* [9] та інші експериментально і теоретично визначили, що руйнування

кристала за рахунок сили тертя відбувається за частоти у 9000,0 Гц. Таким чином, автори роблять висновок, що низькочастотні коливання, накладені на метал зварювальної ванни, не можуть створити сили, здатні механічно руйнувати кристали.

Виходячи з вищевикладеного, автори пропонують гіпотезу, згідно з якою першорядне значення в отриманні дрібнозернистої структури з накладенням низькочастотних коливань грають саме температурні коливання рідкої фази, що обумовлюють періодичну зміну ступеню концентраційного переохолодження цієї фази перед фронтом кристалізації і дифузійні процеси в цій зоні. Тобто концентраційне переохолодження є основним чинником, що порушує тепловий баланс на границі між фазами і призводить до періодичності процесу кристалізації металу шва. Період затвердіння є сумою 2-х складових: 1 – час накопичення домішки в процесі послідовної кристалізації сплаву до моменту появи критичного значення концентраційного переохолодження, яке зумовить стрибкоподібний ріст дендритів з виділенням прихованої теплоти затвердіння; 2 – час об'ємної кристалізації переохолодженої зони рідкої фази, протягом якого йде процес виділення прихованої теплоти плавлення. Для отримання дрібнодисперсної структури автори [9] рекомендують пригнічувати спрямоване зростання кристалів за рахунок створення нових центрів кристалізації в рідкій фазі, що досягається або збільшенням швидкості зварювання, або зниженням градієнта температури в розплаві саме за рахунок накладення низькочастотних коливань. Джерелами таких коливань на думку автора може виступати зовнішнє реверсивне електромагнітне поле, але не можуть виступати механічні джерела. Частота цих коливань повинна узгоджуватися з часом накопичення домішок перед фронтом кристалізації, швидкістю зварювання і складом сплаву. Значення оптимальної частоти має бути визначено як величина, зворотна періоду затвердіння.

Дана гіпотеза в певній мірі підтверджує висновки досліджень, викладених у праці А.И. Ландау (рос.) [10], згідно з якими пригнічення утворення комірчастої структури в металі шва забезпечується уповільненням швидкості росту твердої

фази, тобто збільшенням часу дифундування домішки в розплав і створенням різкого температурного градієнта, що забезпечує стійкість плоского фронту. З іншого боку, автори В.П. Морозов (рос.) [2] та Г.А. Славин (рос.) [11] скептично ставляться до цієї гіпотези, пояснюючи це тим, що автором не врахована наявність стійких центрів кристалізації на границі між фазами, які є центрами кристалізації, що є більш виправдано з позиції термодинаміки. Окрім того, даний процес відбувається раніше, ніж значення переохолодження досягне необхідної величини для забезпечення сталого процесу утворення центрів кристалізації у розплаві. Виходячи з цього, Г.А. Славин (рос.) [11] висунув гіпотезу з позиції термодинаміки зародження центрів кристалізації і зростання кристалітів, спираючись на роботу Б. Чалмерса (рос.) [5] де показано, що зміна вільної енергії при утворенні зародка на поверхні між фазами є меншою за зміну енергії гомогенного утворення зародка, що обумовлює найбільшу ймовірність зародження центрів кристалізації в рідкій фазі на домішках, які мають місце в сплавах. Гіпотетично автор припустив, що для надання стійкості цим центрам кристалізації необхідно збільшити переохолодження, але через наявність стійких центрів кристалізації на границі між фазами це зробити неможливо. Тому, на думку автора, їх необхідно знищити за допомогою оплавлення завдяки накладенню на зварювальну ванну зовнішніх коливань. Період кристалізації автор визначає як суму трьох складових: 1 – час, необхідний для зняття перегріву біля границі між фазами і створення концентраційного переохолодження (час зупинки процесу кристалізації); 2 – час, протягом якого дендрит проросте скрізь зону переохолодження; 3 – час затвердіння междендритної рідини. Частота зовнішніх коливань, що накладаються на зварювальну ванну, повинна визначатися як величина, зворотна періоду кристалізації, бути функцією від режиму зварювання і складу зварюваного металу.

Слід зазначити, що дана гіпотеза, так само як і гіпотеза Г.А. Славина (рос.) [11], підтримує провідну роль концентраційного переохолодження при кристалізації, однак частота зовнішніх коливань

узгоджується з тривалістю затвердіння зони переохолодження, а не з часом накопичення домішок перед фронтом кристалізації.

У своїй гіпотезі В.П. Морозов (рос.) [2] вважає, що оплавлення дендритів, а значить і основного металу, призведе до зміни співвідношення концентрацій матричного елементу і домішки, причому концентрація домішки знизиться, що зменшить кількість стійких центрів кристалізації. Збільшення ж температури фронту кристалізації не прискорить ріст дендритів, а зменшить.

Г.В. Сутырин (рос.) відзначає [12], що дрібнозернисту структуру забезпечують коливання як низької частоти, так і ультразвукової, але механізм впливу на метал зварювальної ванни є різний. Ця різниця пояснюється тим, що при ультразвукових коливаннях частота має один порядок зі швидкістю росту кристалів і саме це унеможливорює зростання його до великих розмірів. У випадку ж з низькочастотними коливаннями – за час половини періоду кристал зростає до великих розмірів, що суперечить факту отримання високого ступеню диспергування. У зв'язку з цим висунуто гіпотезу, згідно з якою настає момент, коли власна частота вже вирощеного кристала накладається на частоту зовнішнього коливання, що зумовлює появу ефекту резонансу і, як наслідок, його руйнування і подрібнення. Однак відповідні дослідження показали повну суперечність з теоретичними розрахунками. Тоді автори висунули іншу гіпотезу, згідно з якою в розплаві металу ванни при накладенні низькочастотних коливань періодично виникають хвилі тиску – адіабатичного стиснення і розрідження, що змінює температуру і густину рідкого металу, а отже створює послідовність періодичних локальних перегрівів й переохолоджень. Відповідно до гіпотези, це обумовлює збільшення ймовірності появи зародків критичних розмірів, які, в свою чергу, збільшують швидкість кристалізації і структурних перетворень. Крім того, миттєва зміна температури сприяє зростанню концентрації дислокацій і в підсумку всі ці процеси призводять до подрібнення зерна. Як зазначає автор, проведені експерименти показали задовільну відповідність з теоретичними результатами. Також дослідження показали, що низькочастотні вібрації позитивно впливають на

дисперсність неметалічних включень, їх концентрацію і розподіл в шві, що зумовило зменшення пор.

Гіпотеза Б.Ф. Якушина (рос.) і А.И. Мисюрова (рос.) [13] пояснює отримання дрібнозернистої структури, як результат переривчастого зростання твердої фази, обумовленого механічним перемішуванням розплаву у зварювальній ванні завдяки накладенню низькочастотних коливань. Механізм подрібнення дендритів є результатом збільшення швидкості росту цієї фази. Зростання ж обумовлено подрібненням дендритних осередків завдяки розгалуженню дендритів твердої фази, механізм якого докладно описаний в монографії Г.С. Жданова (рос.) [14]. Автори гіпотези вважають, що основними фізичними факторами зростання кристалітів є термічне і концентраційне переохолодження. Останнє виникає в процесі затвердіння і сприяє подрібненню дендритів. У своїй роботі автори показали, що в разі зварювання без накладення зовнішніх коливань концентраційне переохолодження має градієнт зростання в напрямку центру шва, що сприяє укрупненню кристалітів. У разі ж накладення зовнішніх електромагнітних збурень, зростання кристалітів за рахунок концентраційного переохолодження припиняється завдяки надходженню перегрітої рідкої фази на фронт кристалізації. Подальше зростання кристалітів обумовлено появою нових центрів кристалізації, тому що подальше епітаксійне зростання при концентраційному переохолодженні неможливе.

В роботах М.А. Абралова (рос.) і Р.У. Абдурахманова (рос.) [15] та С. В. Аристова (рос.) і В.Л. Руссо (рос.) [16] подрібнення структури гіпотетично представляється результатом утворення зародків кристалізації у вигляді рівноосних напівоплавлених гілок дендритів, що відокремилися при оплавленні в результаті накладення зовнішніх коливань електромагнітного поля. Це поле обумовлює температурні флуктуації на границі між фазами, які і є причиною відділення дендритів. Механізм оплавлення автори пояснюють наявністю гілок дендритів з високою концентрацією розчиненого компонента. Внаслідок нерівномірності розподілу цього компонента по об'єму дендрита, розплавлення

відбувається біля основи кристалітів де концентрація розчиненого компонента вище, а, отже, є нижче температура плавлення. Частота коливань електромагнітного поля, що накладається, є функцією швидкості зварювання, температури в зоні кристалізації, температурного інтервалу кристалізації, часу імпульсу і паузи зовнішніх коливань.

Однак в роботі В.П. Морозова (рос.) [2] зазначено, що дана гіпотеза малоімовірна, тому що механізм оплавлення дендритів описаний з позиції процесу лиття, але у випадку зварювання, швидкості кристалізації і відповідні їм градієнти температури дуже великі, що значно скорочує час для реалізації висловлених припущень.

Н.И. Семенюк (рос.) [17] та інші відзначають, що жодна з перерахованих вище гіпотез не враховує впливу зміни температурного градієнта в твердому металі, але, як показали автори в своїй роботі, оплавлення застиглому металу зварного шва хвилиною розплаву супроводжується підвищенням його температури біля границі між фазами, що свідчить про зниження тепловідводу і, як наслідок, зменшення швидкості термічного переохолодження на ній. У роботах А. Оно (рос.) [18] та М. Флемингса (рос.) [19] експериментально доведено, що значення переохолодження, необхідного для епітаксійного зростання кристалітів, не перевищує $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Таким чином, навіть незначна зміна температури в твердій фазі у зоні міжфазної границі може перешкоджати збільшенню значення термічного переохолодження в ній. Виходячи з цього факту, Н.И. Семенюк (рос.) і Д.М. Рабкин (рос.) [20] висунули гіпотезу, згідно з якою спрямоване зростання кристалітів можна регулювати періодичним підвищенням температури твердої фази в зоні міжфазної границі. Автори провели ряд експериментів, впливаючи на застиглий метал шва імпульсами струму. Тривалість імпульсів була $0,05\text{ с}$, сила струму – $50,0\text{ А}$, частота імпульсів – від $1,5\text{ Гц}$ до $7,0\text{ Гц}$. В результаті була отримана полоса дрібних рівноосних зерен, що переходить у зону вибіркової кристалізації в напрямку зварювання, після якої відновилася первісна стовбчато-дендритна структура. Ефект подрібнення структури пояснюється тим, що імпульс струму

змінює розподіл температури в твердому металі після зварювання, а під час паузи відбувається релаксація створеного збурення, тобто теплота, що виділилася, відводиться до зон з більш низькою температурою, в тому числі і до границі між фазами. В результаті знижується швидкість тепловідведення від цієї границі, а значить збільшується тривалість її зупинки. Величина тривалості визначає інтенсивність дифузійних процесів, що перешкоджають зростанню термічного переохолодження на цій границі. Саме в цьому механізмі автори бачать причину порушення росту кристалітів при кристалізації металу шва, неможливості його епітаксіального зростання і створення умов для утворення нових центрів кристалізації. У разі ж високого значення імпульсу струму або близького розташування струмопідводу до зварювальної ванни, імпульсний підігрів буде причиною періодичного оплавлення міжфазної границі і збільшення температури твердого металу, що, на думку авторів, так само повинно приводити до придушення епітаксіального зростання кристалітів за описаним вище механізмом і сприяти формуванню дрібнозернистої структури. Однак В.П. Морозов (рос.) [2] зазначає той факт, що автори висувають цю гіпотезу, спираючись на експериментальні дані робіт [18], [19], які отримані на чистому алюмінії А9 (99,99 % Al), а експериментально її доводять на алюмінієвому сплаві (Al + 0,019 % Zr). Отже, даний факт не дозволяє визнати висунуту гіпотезу доведеною.

И.Г. Тюменцев (рос.) [21] застосовував електромагнітне збурення при зварюванні сталей. Автором висунута гіпотеза про отримання дрібнозернистої структури завдяки одночасного впливу на дугу схрещених електричного і магнітного полів, що забезпечує її коливання. Від частоти реверсування коливання електромагнітного поля залежить ступінь плавлення тієї частини шва, що вже кристалізувалася, і деформування поверхні фронту затвердіння, що дезорієнтує осі первинних кристалітів металу шва, сприяючи, тим самим, отриманню дрібнозернистої структури. Ця частота є функцією швидкості зварювання.

В.П. Черныш (рос.) і В.Д. Кузнецов (рос.) [22] прийшли до висновку, що частота реверсування знаходиться в прямій залежності з ефективним часом розгону

металу зварювальної ванни до швидкості усталеного руху. Тому ключову роль в отриманні дрібнозернистої структури грає інтервал реверсування, який залежить саме від швидкості зварювання.

У статті [23] И.В. Малинкин (рос.) і В.П. Черныш (рос.) висунули припущення, згідно з яким ключовим механізмом отримання дрібнозернистої структури при зварюванні є величина зниження радіального градієнта температури зварювальної ванни, що зумовлює збільшення протяжності зони переохолодження перед фронтом кристалізації, що й досягається завдяки застосуванню електромагнітного збурення. В роботі також наведено залежність ступеня подрібнення структури від параметрів режиму зварювання і теплофізичних властивостей металу, згідно з якою ступінь подрібнення зерна тим вище, чим більше сила струму зварювання, індуктивність електромагнітного збурення і теплопровідність металу, а також чим менше густина металу і в'язкість рідкої фази в зварювальної ванні.

У роботах А.А. Алов (рос.) і В.С. Виноградов (рос.) [24], [25] висунули положення про першорядну важливість впливу коливань рідкого металу зварювальної ванни на характер первинної кристалізації металу шва. Ключовими параметрами в формуванні необхідної структури були визначені частота і амплітуда поперечних переміщень електрода, які обумовлюють коливання ванни рідкого металу. Дослідження проводилися за амплітуди в діапазоні від 0,5 мм до 1,0 мм і за частоти – від 30,0 кол./с до 40,0 кол./с. Однак досліди показали, що зварювання з такими частотними характеристиками істотно не покращує якості з'єднань, що узгоджується з твердженням А.М. Болдырева (рос.) [7], згідно з яким механічні джерела коливань не можуть впливати на структуру металу шва. У статті ж А.М. Макара (рос.) і Б.Н. Кушніренко (рос.) [26] експериментально доводиться зворотне. Автори статті пояснюють це тим, що за час півперіоду коливання відбувається кристалізація однієї частини шва і оплавлення іншої, а також локальне розплавлення основного металу. Під час другого півперіоду оплавляється вже та частина, що кристалізувалася за перший півперіод і т. д. При цьому напрямок росту нових кристалів відрізняється від напрямку вже оплавлених. Таким чином

відбувається дезорієнтація стовбчастої текстури, яка обумовлює дендритну неоднорідність металу шва. Крім того, повторні імпульсні перегріву ділянок, що кристалізувалися раніше, сприяють ослабленню мікроскопічної хімічної неоднорідності. Автори роботи стверджують, що накладення зовнішніх коливань подібним методом забезпечило поліпшення первинної структури металу шву не тільки у високоміцних сталей, а й у інших класах. Треба відзначити, що позитивний вплив поперечних коливань проявляється лише в певному діапазоні, а також велике значення має режим зварювання. Наведені в даній роботі дані підтверджують гіпотези інших авторів, викладені вище щодо того, що на структуру і властивості металу шва впливають не коливання рідкого металу ванни, а характер підведення тепла до фронту кристалізації.

Аналізуючи роботи із застосуванням електромагнітного збурення, В.П. Морозов (рос.) [2] зазначає, що градієнт температури може як збільшуватися, так і зменшуватися, тим самим прискорюючи процес кристалізації або сповільнюючи його. Цей механізм обумовлений тим фактом, що зовнішнє електромагнітне поле буде взаємодіяти з власним полем дуги, чого не враховують автори багатьох робіт при формулюванні гіпотез. У свою чергу автор висуває власну гіпотезу, згідно з якою отримання дрібнозернистої структури можливе, якщо посилити термічне переохолодження розплаву за рахунок створення механізму «гойдалок», що реалізується в умовах резонансу, а саме, визначивши власну частоту кристалізації рідкого металу, виходячи з його теплофізичних властивостей і характеру джерела тепла, накласти синхронізовані примусові зовнішні коливання тієї ж частоти, що і забезпечить резонанс. Як стверджує автор, резонанс буде сприяти переохолодженню розплаву перед міжфазною границею, в результаті чого з'являться додаткові центри кристалізації і збільшиться швидкість кристалізації, а це і зумовить отримання дрібнозернистої структури. В якості зовнішнього джерела коливань можна використовувати модуляцію зварювального струму, механічні та електромагнітні коливання дуги, реверсування магнітного поля, механічні коливання зварного виробу та ін.

З одного боку підтвердженням відповідності гіпотези В.П. Морозова (рос.) [2] у визначенні зміни термічного переохолодження, як основного критерію отримання дрібнозернистої структури, є результати, що викладені в праці А.И. Ландау (рос.) [10], але там само і показано, що в умовах зварювання домогтися цього вкрай складно. Однак, експериментально гіпотезу вдалося підтвердити при зварюванні нержавіючої сталі X18H9 з накладенням зовнішніх поперечних коливань на дугу за частоти у 3,0 Гц та за швидкості зварювання у 11,0 м/год. В результаті була отримана дрібнозерниста структура, де границі кристалів стали розмитими та зникла площина слабину, що забезпечило підвищення пластичності від 25,0 % до 30,0 %. Аналогічних результатів вдалося домогтися під час зварювання високолегованої сталі типу 42X2ГСНМ, що забезпечило підвищення пластичності від 15,0 % до 20,0 %. Теоретично обґрунтовуючи свою гіпотезу, автор посилається на роботи [5], [6], [10], [19].

В роботі В.П. Морозова (рос.) [27] акцентується увага на безпосередньому впливі миттєвої швидкості кристалізації на формування первинної структури металу шва. Обробка експериментальних даних показала, що збільшення швидкості зварювання тягне за собою не тільки збільшення швидкості кристалізації, але і частоти її пульсацій, причому повний період кристалізації складається з трьох часових проміжків: періоду прискореної кристалізації, періоду уповільнення і зупинки. Якраз під час зупинки у деяких металів спостерігався зворотний рух міжфазної границі, що і обумовлювало процес оплавлення металу шва, що вже кристалізувався. Таким чином, ще одним важливим механізмом кристалізаційного процесу є коливання миттєвої швидкості кристалізації, чия частота разом з особливостями отриманої мікроструктури визначає періодичний характер зміни температури охолодження металу шва, що відзначено в роботі [17].

Власна частота кристалізації є функцією відношення швидкості зварювання до відстані між ізотермами, що фіксується в мікроструктурі осьової частини шва [28]. На зміну значення цієї частоти впливають такі чинники, як-от: хімічний склад металу, що зварюється, товщини зварювальних крайок, швидкість зварювання і

інші параметри процесу, значення питомої погонної енергії, значення температури попереднього підігріву [2].

Таким чином, механічні властивості на пряму залежать від теплофізичних і металургійних процесів, які обумовлюють коливальний характер кристалізації металу шва. Крім того, як показав аналіз, необхідно визначити і встановити взаємозв'язок між фізично керованими величинами, що впливають на розмір і форму фронту кристалізації, величину термічного і концентраційного переохолодження, швидкість і темп виділення прихованого тепла та ін. Керування цими величинами дасть можливість формувати необхідну структуру за посередництвом накладення коливань від зовнішнього джерела. Основними регулюючими параметрами мають бути частотні характеристики (амплітуда, частота) і параметри технологічного режиму наплавлення або зварювання.

1.2 Основні методи та технологічні прийоми, що сприяють підвищенню якості наплавленого металу

Відповідно до наведеного вище, всі відомі способи отримання дрібнозернистої мікроструктури наплавленого металу можна розділити на металургійні та технологічні (рис. 1.1 [29]).

Відповідно до тематики даної роботи, накладення зовнішніх коливань відноситься до технологічного методу, який зокрема можна класифікувати за типом введення коливань в розплав, а саме на контактний та безконтактний.

До контактних способів відносять ультразвуковий та механічний методи, а до безконтактних – зварювання з накладенням електромагнітного поля, з використанням модульованого струму, із застосуванням лазерного, світлового або електронного променя. На сьогоднішній день вважається, що безконтактні способи більш перспективні для застосування, оскільки мають більш просту конструкцію джерела зовнішніх коливань і не вимагають серйозних змін в

технологічному процесі. Однак кожен метод має свої особливості в реалізації, що вимагає більш детально розглянути кожен з них.

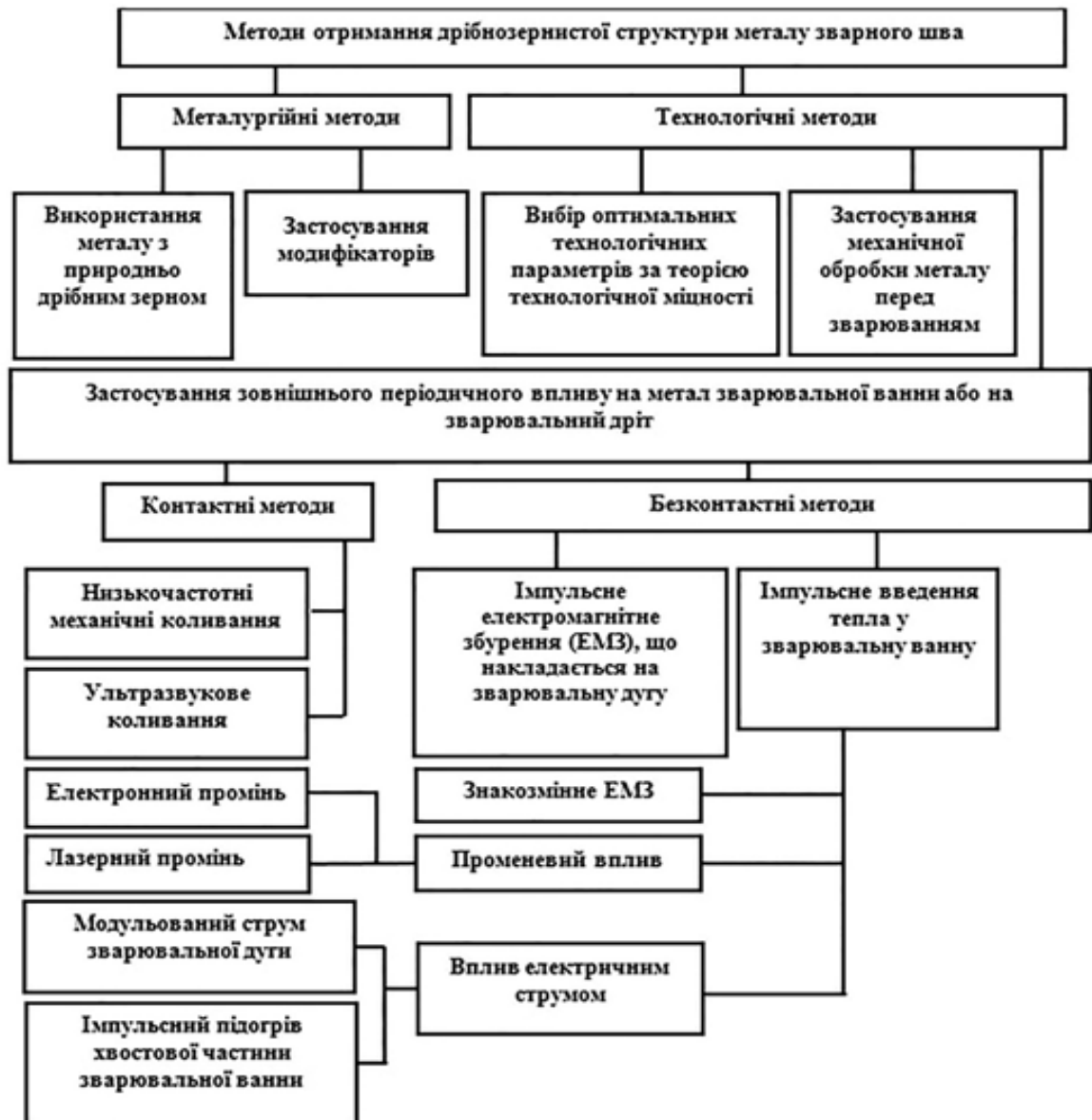


Рисунок 1.1 – Класифікація методів отримання дрібнозернистої структури [29]

Електромагнітне поле. Як відомо, отримання дрібнозернистої структури з застосуванням електромагнітного збурення (ЕМЗ) можливо або при накладенні знакозмінного ЕМЗ на розплав, або за рахунок коливань дуги уздовж або поперек зварювальної ванни, що реалізується за допомогою ЕМЗ.

Взагалі, подрібнення зерна в металі шва спостерігається при накладенні зовнішнього електромагнітного поля як постійного, так і змінного типу, але змінне поле забезпечує краще формування шва.

До основного недоліку впливу зовнішнього поля на розплав можна віднести деяку обмеженість у виборі частоти зовнішніх коливань, оптимальні значення за якою не будуть вище від 25,0 Гц до 30,0 Гц за рахунок інерційності руху розплаву. З одного боку, за такого значення максимальної частоти цілком вистачить для формування дрібнозернистої структури в металах з малою температуропровідністю, наприклад, для зварювання титанового сплаву достатньо від 5,0 Гц до 16,0 Гц [4], алюмінієвого сплаву або нержавіючої сталі – від 0,6 Гц до 15,0 Гц [15] (рис. 1.2). З іншого боку, власна частота кристалізації деяких металів (сплави на основі *Al* і *Mn*) вище за зазначену (від 120,0 Гц до 150,0 Гц), а значить неможливо буде досягти ефекту резонансу. Однак Р.Н. Рыжов (рос.) [30] довів, що застосовуючи імпульсні режими можливо підняти значення максимальної частоти до 200,0 Гц, але при цьому зміниться механізм впливу поля на розплав.

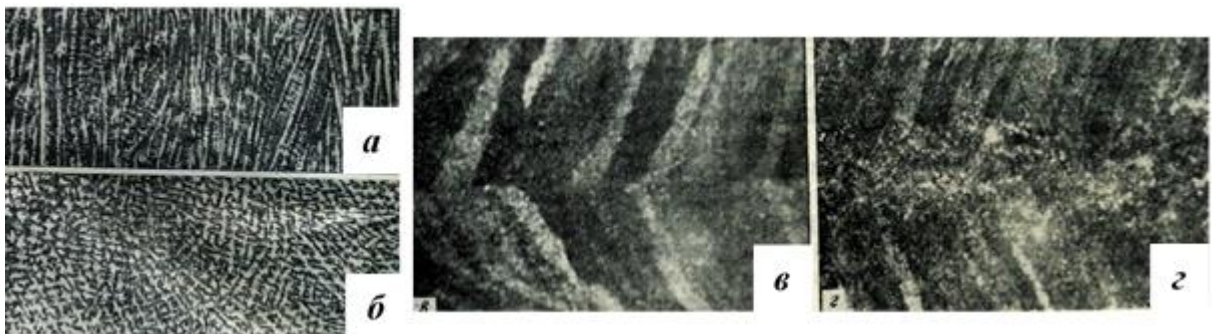


Рисунок 1.2 – Мікроструктура поздовжнього перерізу металу шва аустенітної сталі ($\times 220$) [4]: а – без впливу ЕМЗ, б – при накладенні пульсуючого ЕМЗ за частоти у 12,5 Гц. Макроструктура металу шва сталі 08X18H10T [15]: в – без впливу ЕМЗ, г – при накладенні змінного ЕМЗ

Використання магнітного поля у якості інструменту коливання зварювальної дуги дає змогу не тільки покращити мікроструктуру металу, що наплавляється, але й керувати процесом переносу електродного металу до зварювальної ванни збільшуючи ефективність процесу наплавлення, а також знизити глибину

проплавлення основного металу. А.Д. Размышляев (рос.) [31] та ін. рекомендує використовувати поздовжнє магнітне поле при наплавленні під флюсом ферромагнітних матеріалів, а поперечне – при використанні немагнітних. V. Subravel та ін. [32] з'ясували на базі створення емпіричної моделі, що при зварюванні магнієвого сплаву максимальне значення міцності на розрив можна отримати на рівні 78 % від значення основного металу саме завдяки використанню поперечних коливань дуги за частоти 5,0 Гц та за амплітуди до 1,0 мм.

Взагалі, недоліками використання даної технології є конструктивні особливості зварювального пальника, що накладає певні обмеження при виконанні зварювальних робіт при виконанні багатопрхідних швів або багат шарових валиків. Тим не менш, на сьогоднішній день у зварювальних технологіях досить широко використовують вплив магнітних полів на розплав зварювальної ванни, зокрема шпильок. Так шпильки зі сталі типу *Q235 W. Bai* та ін. [33] приварювали до підложки із сталі *30CrNi3MoV* з використанням повздовжнього магнітного поля, що дозволило значно підвищити ударну в'язкість та стійкість до розповсюдження тріщин, що було обумовлено покращенням мікроструктури наплавленого металу завдяки збільшенню долі та орієнтації зерен голчастого фериту, а також підвищенню ступеню диспергування зерен від 4,3 мкм до 3,1 мкм. Позитивний вплив на значення ударної в'язкості також підтверджено результатами роботи *C. Natividad* та ін. [34], де досліджувались шви, виконані на трубній сталі типу X65 (стандарт API) з використанням вертикального магнітного поля за індукції 6,0 мТл. В роботі показано, що ударна в'язкість збільшується від 120,0 Дж до 226,0 Дж у порівнянні з зразком, отриманим без впливу поля.

При зварюванні нержавіючої сталі типу *AISI 304L* неплавким електродом в умовах впливу вертикального магнітного поля також спостерігається поліпшення як структурних складових, так і збільшення ступеню диспергування наплавленого металу, що суттєво знижує кількість пор у наплавленому металі, але при цьому змінюється мікротвердість структурних складових із збільшенням глибини. *A.V. de Queiroz* та ін. [35] показали, що за потужності магнітного поля у 2,5 Тл,

значення мікротвердості на глибині 0,2 мм від поверхні складало 220,0 *HV*, а на глибині 0,3 мм вже 213,0 *HV*; за 7,5 Тл значення мікротвердості зменшується за модулем, але зростає із збільшенням глибини: за 0,2 мм – 120,0 *HV*, а за 0,3 мм – 172,0 *HV*. З іншого боку *F.F. Curiel* та ін. [36] зазначають, що вплив вертикального магнітного поля за індукції у 9,0 мТл сприяє не тільки утворенню дрібнозернистої структури, але й збільшенню долі корисних структурних складових, таких як δ -ферит та мартенсит, у мікроструктурі наплавленого металу, що суттєво знижує розтріскування та точкову корозію у водних розчинах кислих солей, але із збільшенням потужності магнітного поля виникають проблеми з проплавленням, формуванням шву та утворенням точкової корозії. Таким чином, вплив магнітного поля у даному випадку на мікроструктуру є неоднозначним.

Використовуючи повздожнє постійне магнітне поле при зварюванні низьковуглецевої сталі, підвищення механічних властивостей наплавленого металу не тільки не спостерігається, але навпаки – вони знижуються у порівнянні із зварюванням без впливу магнітного поля. Так, у роботі *N. Che Lah* і *M.H. Hussin* [37] наводяться дослідження твердості, міцності на розтягнення та мікроструктури за значеннями магнітної індукції у 1400,0 Гс, 1600,0 Гс, 1800,0 Гс та без впливу магнітного поля (рис. 1.3).

Результати досліджень показали, що, незважаючи на покращення мікроструктури, значення твердості наплавленого металу знижувались із підвищенням сили магнітного поля, а металу ЗТВ – навпаки підвищувались, утворюючи суттєву різницю (рис. 1.3, а).

Міцність на розтягнення також зменшувалась за підвищенням магнітної індукції у порівнянні із зразком, отриманим без впливу магнітного поля (рис. 1.3, б). У той же час, за результатами роботи [34], при зварюванні швів у присутності вертикального поля за індукції у 6,0 мТл (60,0 Гс) значення твердості майже не змінюється у порівнянні із зразками, отриманими без впливу поля.

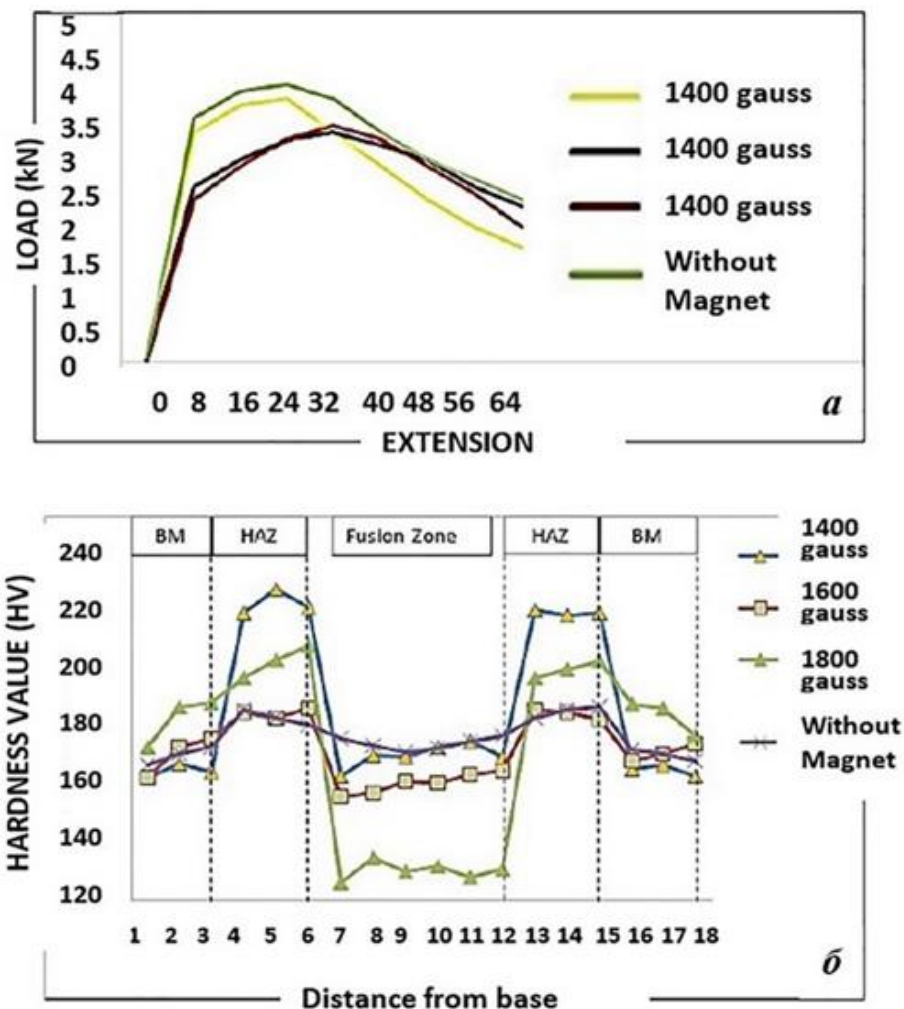


Рисунок 1.3 – Графіки: а – міцності на розтягнення, б – твердості зразків, що отримані при магнітних полях за значеннями магнітної індукції у 0,14 Тл (1400,0 Гс), 0,16 Тл (1600,0 Гс), 0,18 Тл (1800,0 Гс) та без впливу магнітного поля [37]

Імпульсний (модульований) струм і імпульсна подача електродного дроту. Модульований струм надає подвійний коливальний вплив на розплав:

- теплове, за рахунок амплітудного значення струму;
- механічне, за рахунок форми дуги, що змінюється.

В.П. Морозов (рос.) [38] зазначає, що при зварюванні модульованим струмом дрібнозерниста структура формується за амплітудним значенням струму у 900,0 А, понад цього значення будуть з'являтися дефекти у вигляді надлишкового посилення і більш глибокого і вузького проплавлення. Саме амплітудне значення струму визначає теплову складову періодичного впливу дуги на розплав. Як

ззначають *H. Maruo* і *Y. Hirata* [39] та Е. А. Столпнер (рос.) і Г.А. Славин (рос.) [40], механічна складова визначається за частотою накладення і за формою імпульсів струму. Так, Г.А. Славин (рос.) та ін. [41] відзначають, що при зварюванні зразків з металів, які мають різні теплофізичні характеристики, а саме: алюмінієвого Д20, титанового ОТ4, на базі нікелю ВЖ98 та ВЖ100, ніобієвого та жаростійкого ЭИ696 сплавів – спостерігалася формування дрібнозернистої структури за величиною частоти накладення імпульсів від 10,0 Гц до 15,0 Гц, але за частот понад за 15,0 Гц і менш за 10,0 Гц ефект дрібнозернистості зникав (рис. 1.4, 1.5). Зварювання проводилося дугою постійного струму з накладанням на неї імпульсів струму за амплітудним значенням у 600,0 А, що дозволило суттєво підвищити пластичні властивості та стійкість проти гарячих тріщин.



Рисунок 1.4 – Мікроструктура поздовжнього перерізу металу шва сплаву ВЖ98 ($\times 100$): а – з накладенням імпульсів струму, б – без накладення імпульсів струму [41]



Рисунок 1.5 – Макроструктура поздовжнього перетину метала шва сплаву ОТ4 ($\times 100$): а – з накладенням імпульсів струму, б – без накладення імпульсів струму [41]

З іншого боку, авторам роботи [20] вдалося отримати дрібнозернисту структуру при зварюванні алюмінієвих сплавів постійної дугою із застосуванням періодичної підігріву хвостової частини зварювальної ванни спеціальним пристроєм, який переміщався слідом за зварювальним пальником. За цим суцільна дрібнозерниста структура була отримана за струмом імпульсу у 50,0 А і за частоти імпульсів у 7,0 Гц (рис. 1.6).

У статті В.Н. Липодаєв (рос.) і В.В. Снисарь (рос.) та ін. [42] наводять результати багат шарового наплавлення під флюсом, в результаті якого була отримана дрібнозерниста структура за частоти імпульсу струму у 2,78 Гц (рис. 1.7).

Дані цих експериментів близькі до результатів роботи [20] і отримані для сталі, що обумовлює можливість отримувати дрібнозернисту структуру за низьких значень частоти проходження імпульсів струму і для інших металів.



Рисунок 1.6 – Структура металу в горизонтальному перетині зварного шва ($\times 125$, зменш. 2/3): а – без імпульсного підігріву, б – з локальним імпульсним підігрівом з частотою 7,0 Гц, в – момент включення імпульсного підігріву [20]



Рисунок 1.7 – Зміна дендритів структури наплавленого металу в залежності від режиму зварювання ($\times 100$, зменш. 1/2) [42]: а – без модуляції, б, в – з модуляцією

Відповідно до зміни мікроструктури змінюються й службові характеристики. Так, при імпульсно-дуговому зварюванні за амплітудою струму у 450,0 А та за частотою від десятків до сотень герц, в середовищі $Ar + 18,0\% CO_2$ зміцненої сталі типу S460M (ДСТУ EN 10025-4:2007) товщиною 16,0 мм з V-подібним розкриттям крайок дротом суцільного перерізу G3Si1 діаметром 1,2 мм А.В. Завдовеев (рос.) та ін. [43] відзначають досягнення більших значень міцності шву при збереженні показників ударної в'язкості, а також достатньо високі показники опірності крихкому руйнуванню в ЗТВ зварних з'єднань. Порівняльний розподіл

мікротвердості зварного з'єднання за імпульсно-дуговим процесом у порівнянні з процесом на постійному струмі наведено на рисунку 1.8.

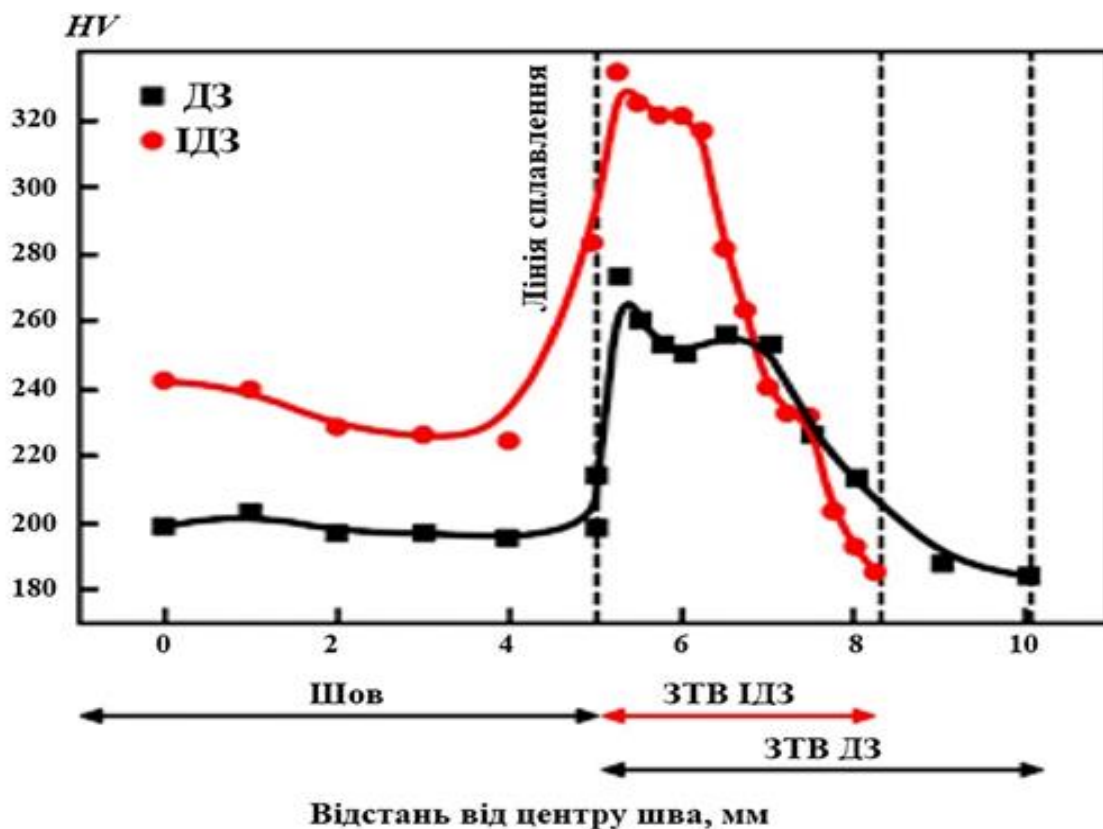


Рисунок 1.8 – Графік твердості зварних з'єднань сталі S460M при дуговому зварюванні (ДЗ) та імпульсно – дуговому (ІДЗ) [43]

Застосування вібродугового наплавлення, що розроблено Г.П. Клековкиним (рос.) на початку 50 – х роів 20-го століття [44], здебільшого застосовується для наплавлення сталевих та чавунних деталей типу тіл обертання. Сутність способу полягає у подаванні електродного дроту таким чином, щоб він здійснював коливальні рухи відносно поверхні, періодично торкаючись її. Дуга горить до моменту короткого замкнення дроту з поверхнею, після чого зварювальний дріт відходить від поверхні на задану відстань і дуга загорається знову. В залежності від марки електродного дроту можна отримати твердість наплавленого шару від 37,0 HRC до 65,0 HRC (від 3560,0 МПа до 8041,0 МПа) за струмом зворотної полярності від 70,0 А [44] до 250,0 А [45], за напругою у діапазоні від 4,0 В до 32,0 В [46], за частотою коливань від 25,0 Гц до

100,0 Гц [45], [46] та за амплітудою у діапазоні від 1,0 мм до 3,0 мм [44]. Діаметр зварювального дроту обирається у межах від 1,0 мм до 3,0 мм [46].

В.А. Лебедев (рос.) та ін. [47] використовували імпульсну подачу електродного дроту, що суттєво покращило мікроструктуру наплавленого металу та відповідно зносостійкість в оптимальному діапазоні параметрів при наплавленні в CO_2 : за частоти від 10,0 Гц до 30,0 Гц, за шпаруватістю від 3 одиниць до 5 одиниць – у порівнянні з наплавленням зі сталюю його подачею. Покращення мікроструктури обумовлено збільшенням ступеня диспергування мікроструктури та зменшенням кількості структурних складових – зокрема полігональний ферит, що знижує твердість.

На сьогоднішній день стрімко розвиваються адаптивні технології зварювання і наплавлення. Даний напрямок дозволяє здійснювати програмоване введення теплоти в зону зварювання, контролювати процеси плавлення і перенесення кожної краплі електродного металу, формуючи, тим самим, дрібнодисперсну структуру. Зазначені переваги адаптивної технології забезпечуються завдяки коригуванню основних енергетичних параметрів зварювального режиму в залежності від їх миттєвих значень і стану об'єкта управління "джерело живлення – дуга – зварювальна ванна". Використання даної технології можливе завдяки сучасним інверторним джерелам живлення, які мають відповідне інтелектуальне забезпечення у складі своєї конструкції. Так, в роботі Ю.Н. Сараєв (рос.) та ін. [48] досліджували вплив адаптивного режиму зварювання на границю міцності, текучості, відносне подовження, ударну в'язкість металу шва та рівень залишкових зварювальних напружень у порівнянні зі стаціонарним режимом. Дослідження проводились на відповідному джерелі живлення ФЕБ – 315 «МАГМА». Шви виконувались на сталі 09Г2С. Було доведено, що зразки, які отримані за адаптивним режимом, мали значення ударної в'язкості металу шва у 1,85 рази більше, а також – більш сприятливий розподіл залишкових зварювальних напружень у шві. Інші досліджувані службові характеристики майже не змінились. Зварювання проводилось у 2 проходи: кореневий та основний за струмом імпульсу

у 90,0 А та у 180,0 А відповідно, за частотою у 1,67 Гц (час паузи та імпульсу дорівнює 0,3 с).

Механічні коливання. Накладення коливань на розплав зварювальної ванни механічним методом підвищує ступінь диспергування мікроструктури за частоти коливань до 100,0 Гц (до 200,0 Гц за [12]). При цьому частота температурних коливань у розплаві в процесі кристалізації при поздовжніх коливаннях, викликаних зовнішнім джерелом, буде збігатися з його власною частотою, а при поперечних – буде дорівнювати його подвійній частоті [7]. На думку авторів, цей механізм дозволяє досить ефективно керувати процесом отримання дрібнозернистої структури без додаткових матеріальних і технічних витрат.

В роботі [12] показано, що найбільший ступінь подрібнення завдяки зовнішнім коливанням зварювальної ванни при зварюванні сталі 1Х18Н9 і сплаву АЛ - 3 був досягнутий за частоти вібрацій від 50,0 Гц до 60,0 Гц за амплітуди від 0,8 мм до 1,0 мм (рис. 1.9).

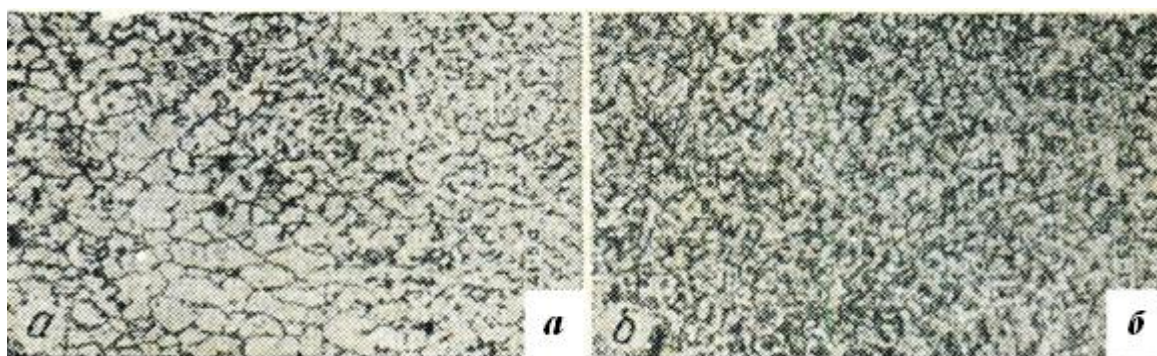


Рисунок 1.9 – Мікроструктура наплавленого металу типу 1Х18Н9 ($\times 160$) [12]: а – без вібрацій, б – з вібрацією з частотою у 50,0 Гц

Дані результати підтверджуються і в роботі М.З. Зарипова (рос.) та ін. [49], де при накладенні коливань за амплітуди від 0,6 мм до 0,8 мм і за частоти у 50,0 Гц та 100,0 Гц на зварювальну ванну вдалося отримати зменшення зерна на 23,0 % – за 50,0 Гц і на 15,0 % – за 100,0 Гц у порівнянні із зразком, отриманим без коливань. При цьому зварювання прямолінійних швів виконувалося вручну на сталі типу 12Х18Н10Т. У цій самій роботі відзначено, що застосування подібних коливань

сприяє збільшенню ступеню опору втомі при навантаженні в області пружно-пластичної деформації на 22,0 %.

В роботі А.Н. Салмин (рос.) та ін. [50] таким самим способом зварювання та із застосуванням близького за параметрами вібраційного режиму виготовляли кільцеві шви на сталі 1Х11Н2В2МФ. Дослідження показали, що завдяки вібрації величину ударної в'язкості вдалося збільшити на 35,0 % в зварному шві і на 58,0 % у зоні сплавлення у порівнянні із зразками, що отримані без впливу коливань. У той же час, при зварюванні з накладенням поперечних коливань на електрод за амплітуди від 0,5 мм до 1,0 мм і за частоти від 30,0 Гц до 40,0 Гц якість зварного шва покращилася несуттєво, що відображено в роботах [24], [25]. На думку авторів роботи [16], дані факти вказують, що співвідношення частотних характеристик по-різному впливають на механізм формування дрібнозернистості, а саме, встановлено, що діапазон частот можна умовно розділити на 3 частини.

У першому випадку, за частоти від 1,0 Гц до 10,0 Гц, необхідно встановлювати значення амплітуди не менше ніж за 3,5 мм, щоб протягом періоду кристалізації розплав мав змогу досягти фронту кристалізації й тим самим змінити його завдяки оплавленню дендритів на границі між фазами. За таких умов утвориться велика кількість уламків, частина з яких виноситься в розплав і розплавляється, а інша частина осяде на фронті кристалізації, забезпечуючи формування дрібнозернистої структури. З іншого боку, в роботі [25] найкращі результати були досягнуті за частоти зовнішніх коливань у діапазоні від 15,0 Гц до 30,0 Гц – для низьковуглецевої сталі і від 30,0 Гц до 50,0 Гц – для алюмінію. Амплітуда коливань торця електроду при зварюванні для обох металів не перевищувала 0,5 мм. Це підтверджується і відносно недавніми дослідженнями. Так, в роботі А.А. Selvi [51] показано, що за діапазоном частот від 0,76 Гц до 2,5 Гц за постійною амплітудою коливання зварювального інструменту поперек осі шва у 2,0 мм – що є також менше за 3,5 мм, починають з'являтися рівноосні зернисті структури, які змінюють класичну стовбчасту структуру щонайменше вже за частотою у 1,56 Гц. Експерименти проводилися без присадного матеріалу на пласкі зразки з

нікель- хромового сплаву інконель 690. Однак в роботі *V.S. Bade* та ін. [52] показано, що збільшення твердості наплавленого металу і металу ЗТВ, які обумовлені збільшенням ступеня диспергування зерна, спостерігалися вже за частоти у 1,076 Гц з подальшим збільшенням ступеню подрібнення до значення у 4,45 Гц. Однак, з подальшим збільшенням частоти до значення у 5,4 Гц розмір зерна почав збільшуватися з відповідним зменшенням твердості. Тут експерименти проводили накладенням коливань на зварювальний електрод при зварюванні плоских зразків з вуглецевої сталі типу 1018. Таким чином, різниця в результатах робіт [51] і [52] викликана умовами проведення експериментів, однак ці результати лише частково задовольняють висновкам роботи [16].

У другому випадку, за частоти у діапазоні від 10,0 Гц до 20,0 Гц, характер отримання дрібнозернистої структури носить перехідний характер, за умови, що значення амплітуди буде не менш за 2,0 мм.

У третьому випадку, за частоти у понад 20,0 Гц, незалежно від величини амплітуди, на фронті кристалізації не виявлено будь-яких температурних коливань, що, на думку авторів, пояснює отримання дрібнозернистої структури тільки завдяки механічному впливу хвиль розплаву на міжфазну границю.

В загалі, останнім часом спостерігається тенденція до застосування вібрацій з досить великими значеннями частоти при незначних амплітудах, причому суттєве диспергування структури відбувається як при коливаннях ванни, так і зварювального інструменту, що позитивно впливає на деякі механічні властивості зварних швів. У якості матеріалів, що зварюються, використовують зазвичай нержавіючу і вуглецеву сталі та алюмінієві сплави.

Так, при поперечних коливаннях зварювальної ванни за амплітуди від 130,0 мм до 180,0 мкм та за частоти у 75,0 Гц, *R. Tamasgavabari* та ін. [53] були отримані зразки з алюмінієвого сплаву, у яких границя міцності збільшилася до 9,0 %, а границя втомної міцності, за даними *M.V. Rao* та ін. [54], підвищилася щонайменше на 12,0 % у порівнянні із зразками, що отримані без впливу коливань, однак значення твердості наплавленого металу при цьому майже не змінилися. При

цьому середній розмір кристаліту завдяки коливанням зменшився від 200,0 мкм до 75,0 мкм [53].

З іншого боку, при дослідженні зразків з нержавіючої сталі, що зварювались неплавким електродом у середовищі аргону з вібрацією зварювальної ванни з близьким значенням частоти, *C.C. Hsieh* та ін. [55] було встановлено, що твердість наплавленого металу збільшується на 2,5 % та на 7,3 % у порівнянні із зварюванням без впливу вібрації. Причому найбільше значення твердості має місце за резонансними режимами роботи вібратора: за відносної амплітуди у 0,8 В за частоти у 60,9 Гц; за відносної амплітуди у 8,0 В за частоти у 376,0 Гц. Менше значення твердості отримано за дорезонансних режимів: за відносної амплітуди у 0,3 В за частоти у 59,3 Гц; за відносної амплітуди у 3,0 В за частоти у 362,0 Гц. Автори відмічають, що причиною збільшення твердості є поліпшення мікроструктури, а також збільшення ступеню її диспергування. Також подрібнення мікроструктури наплавленого металу при зварюванні зразків з нержавіючої та низьковуглецевої сталі позитивно впливає на показник ударної в'язкості. Так, за даними *J. Kalpana* та ін. [56], під впливом коливань за значно більшими значеннями частоти, ніж у роботі [55], а саме від 600,0 Гц до 1000,0 Гц, та за амплітуди від 0,2 мм до 0,425 мм, ударна в'язкість збільшується від 4,3 % до 25,0 % у порівнянні із зразками, отриманими без впливу вібрацій. Слід зазначити, що відповідно до результатів *J.S. Gill* і *T.K. Reddy* [57], при зварюванні нержавіючої сталі коливання ванни позитивно впливають на показник границі втомної міцності, збільшуючи його. При цьому виконувати зварювання слід за якомога більшому значенню зварювального струму, якщо необхідно збільшити значення показника границі міцності на розрив, але якщо необхідно збільшити значення показника границі втомної міцності, то необхідно навпаки – вести зварювання за зниженим значенням струму. Так, при зварюванні зразків з коливаннями зварювальної ванни, за силою зварювального струму у 120,0 А значення границі втомної міцності збільшилося на 25,0 % у порівнянні з режимом без коливань, а за значенням у 150,0 А – на 11,0 %, значення границі міцності на розрив за силою зварювального

струму у 120,0 А збільшилося на 4,0 %, а за значенням у 150,0 А – на 8,8 % за тим самим коливальним режимом [57].

Використовуючи коливання розплаву зварювальної ванни при зварюванні зразків з низьковуглецевої сталі, збільшення значення показника границі міцності приблизно таке саме, як при зварюванні нержавіючої сталі, але значення твердості наплавленого металу зростає значно більше. Як зазначають *P.K. Singh* та ін. [58], при використанні вібрацій зварювальної ванни за частоти у 300,0 Гц та за амплітуди у 0,5 мм показник границі міцності збільшився на 23,0 %, границі текучості – на 27,0 %, а твердості наплавленого металу – від 8,7 % до 19,5 % у порівнянні зі зварюванням без впливу коливань. У даному випадку коливання вводились у розплав зварювальної ванни безпосередньо через тонкий дротоподібний вібратор, кінець якого був занурений у розплав. *S.P. Tewari* [59] застосовував повздовжні коливання зварювальної ванни за частоти у 400,0 Гц та за амплітуди у 40,0 мкм, що дозволило максимально зменшити розмір зерна у 6,0 разів та відповідно підвищити значення границі текучості на 21,0 %, границі міцності на розтягнення – на 26,0 %, а границі міцності на розрив – на 39,0 % у порівнянні зі зварюванням без впливу коливань зразків з середньовуглецевої сталі.

Таким чином можна резюмувати, що загальна тенденція полягає у збільшенні частоти механічних коливань до частот значно більших за 10,0 Гц з одночасним зменшенням амплітуди від 2,0 мм. Тобто, залишається слабо дослідженим діапазон частот у приблизному діапазоні від 1,0 Гц до 10,0 Гц та амплітудами від 2,0 мм та більше.

Коливання ультразвукового діапазону. Як показано в роботі *А.А. Ерохіна* (рос.) і *Л.Л. Силина* (рос.) [60], основним недоліком впливу ультразвукових коливань на розплав зварювальної ванни є велика ймовірність утворення гарячих тріщин на ділянках шву, що знаходяться під максимальними напруженнями, які обумовлені нерівномірністю розподілу ефекту впливу коливань по довжині шва при поширенні ультразвукової хвилі. Даний недолік дозволяє вести зварювання тільки за розташуванням зварювальної ванни у площині пучності

коливань, а саме там, де величина напружень дорівнює нулю. Прикладами такого типу зварювання є електрошлакове зварювання стиків арматури, кільцевих швів труб, точкове або шовне зварювання, контактне зварювання листових конструкцій та ін.

Іншим серйозним недоліком отримання дрібнозернистої структури із застосуванням ультразвукових коливань є складність передачі цих коливань розплаву зварювальної ванни, що, як правило, пов'язане з розсіюванням енергії. Даний недолік відкриває широке поле діяльності для створення нових і вдосконалення старих типів введення коливань в розплав. Так, в роботі [60] запропоновано передавати коливання зварювальної ванни за посередництвом випромінювача ультразвукових коливань, що занурений у зварювальну ванну та не залучений у електричну мережу, що, на думку авторів, є найбільш універсальним способом, але розмір зварювальної ванни та особливості перенесення електродного металу до неї суттєво обмежує його практичну реалізацію. Так, в роботі *H. Ohrdes* та ін. [61] у якості зварювального інструмента використовували лазерний промінь, а ультразвукові коливання створювались генератором та накладались на зварювальну ванну за посередництвом гідравлічної муфти, що являє собою ємність з рідиною, у яку було занурено зразки, що зварюються. Матеріалом зразків виступав алюмінієвий сплав типу *EN AW-6082*, частота коливань була 20,0 кГц, амплітуда обиралась експериментальним шляхом у діапазоні від 2,0 мкм до 8,0 мкм. Дослідження показали, що із збільшенням амплітуди коливань до 6,0 мкм спостерігається зменшення розміру зерна у наплавленому металі, але й збільшується ступінь вибрикування розплаву із зварювальної ванни (рис. 1.10).

В роботі *H. Chen* та ін. [62] ультразвукові коливання за частоти у 27,0 кГц накладалися на деталі, що зварюються, безпосередньо до їх поверхні на відстані 30,0 мм від зварювальної ванни. Зразки були з низьколегованої сталі для суднобудування марки *E40*. Зварювання відбувалося під водою порошковим дротом. За результатами досліджень встановлено, що завдяки коливанням поліпшилася мікроструктура наплавленого металу, а саме, полігональний ферит

майже зник, а ширина феритних зерен зменшилася від 34,0 мкм до 10,0 мкм, що обумовило підвищення механічних властивостей: твердість збільшилася від 204,0 *HV* до 276,0 *HV*, границя міцності на розрив – від 545,0 МПа до 610,0 МПа, а ударна в'язкість – від 65,0 Дж/мм² до 71,0 Дж/мм² у порівнянні із зварюванням без впливу коливань.

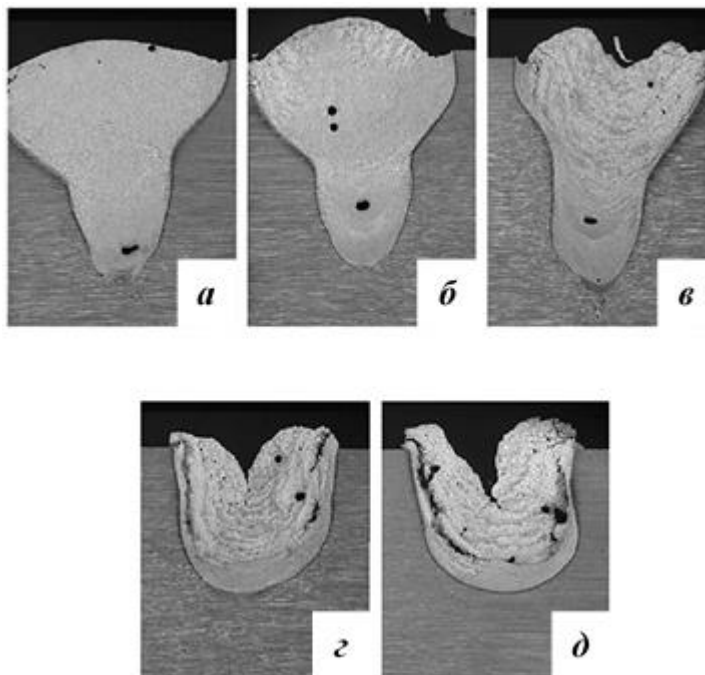


Рисунок 1.10 – Поперечні перетини швів, що отримані за різних значень амплітуди [61]: а – 0 мкм, б – 2,0 мкм, в – 4,0 мкм, г – 6,0 мкм, д – 8,0 мкм

При накладенні вібрацій за амплітуди у діапазоні від 0,6 мм до 0,8 мм і за частотою – від 25,0 кГц до 27,0 кГц на зварювальну ванну під час ручного зварювання нержавіючої сталі типу 12Х18Н10Т [49] авторам вдалося зменшити зерно мікроструктури на 3,8 %, а за частоти 50,0 Гц та за тою ж самою амплітудою – на 23,0 %, а за 100,0 Гц – на 15,0 % у порівнянні із зразком, отриманим без коливань (рис. 1.11). Автори відзначають, що застосування ультразвукових коливань сприяє збільшенню ступеню опору втомі при навантаженні в області пружно-пластичної деформації на 26,0 % проти 24,0 % на зразках, що отримані за частот 50,0 Гц та 100,0 Гц. Таким чином, питання про оптимальне співвідношення амплітуди і частоти зовнішніх ультразвукових коливань поки має вирішуватися емпіричним шляхом за конкретних умов проведення експерименту.

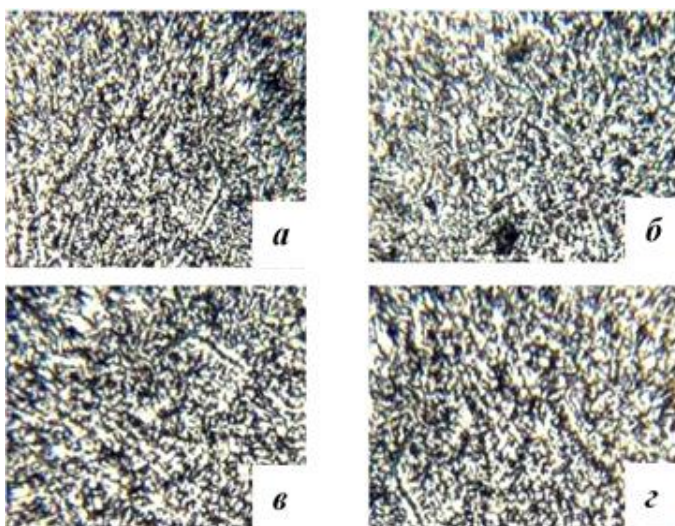


Рисунок 1.11 – Мікроструктура наплавленого металу за амплітуди від 0,6 мм до 0,8 мм та за частоти ($\times 300$) [49]: а – 50,0 Гц, б – 100,0 Гц, в – від 25,0 кГц до 27,0 кГц, г – без вібрації

1.3 Висновки до розділу 1

1. На сьогоднішній день висунуто досить велика кількість гіпотез, що описують процеси формування дрібнозернистої первинної структури під час кристалізації металу шва в умовах зовнішніх коливань розплаву зварювальної ванни або інструменту. Суперечливість цих гіпотез не дає змоги розробити теорію щодо визначення оптимального значення амплітуди і частоти цих коливань. Таким чином, дана задача наразі вирішується шляхом моделювання або за допомогою статистичних методів обробки емпіричних даних.
2. У більшості робіт автори розглядають формування первинної структури або з позиції механічного, або теплового механізму. Однак, вплив на фронт кристалізації можуть надавати фізичні явища, властиві обом цим механізмам. Окрім того, ці механізми взаємопов'язані між собою, що зумовлює необхідність в створенні моделі, яка враховує як гідродинамічні процеси, так і процеси тепло- та масо- переносу в умовах періодичного зовнішнього впливу. Основними параметри процесу наплавлення/зварювання, завдяки яким можна визначити ці механізми, є сила струму дуги (потужність

променю), швидкість наплавлення та частота й амплітуда коливань, що накладаються.

3. В сучасних роботах авторів експериментально доведено, що при різних способах зварювання виділяються такі основні технологічні способи диспергування та оптимізації структури металу шву (наплавленого металу): вплив змінного електромагнітного поля на розплав зварювальної ванни та дугу за частоти у діапазоні від 0,6 Гц до 200,0 Гц, за амплітуди – до 1,0 мм, постійного електромагнітного поля на розплав зварювальної ванни із значенням магнітної індукції від 6,0 мТл до 0,18 Тл; вплив імпульсного (модульованого) струму і імпульсна подача електродного дроту за частоти від 1,67 Гц до 50,0 кГц, за амплітуди від 50,0 А до 900,0 А, у випадку імпульсної подачі дроту – від 1,0 мм до 3,0 мм; періодичний механічний вплив на розплав зварювальної ванни та зварювальний інструмент за частоти від 1,076 Гц до 1000,0 Гц, за амплітуди від 40,0 мкм до 2,0 мм; вплив періодичної дії ультразвукового діапазону на зварювальний інструмент та деталь, що зварюється / наплавляється за частоти від 20,0 кГц до 27,0 кГц, за амплітуди від 6,0 мкм до 0,8 мм.

Як показано при аналізі в різних роботах сучасних авторів, експериментально доведено, що мікроструктура наплавленого металу починає подрібнюватись вже за частоти коливань зварювальної дуги у діапазоні від 1,076 Гц (1,56 Гц) до 5,4 Гц, але з подальшим її збільшенням розмір зерна починає зростати з відповідним зменшенням твердості. Таким чином, граничні умови початку зміни мікроструктури під впливом примусових механічних коливань зварювальної дуги на розплав зварювальної ванни є за частотним діапазоном від 1,0 Гц (1,5 Гц) до 5,0 Гц, за діапазоном амплітуд від 6,0 мкм до 3,0 мм.

4. Відомі технологічні способи реалізації механічних коливань у зварювальних процесах з використанням плавкого електроду є: коливання (вібрації) зразка, що зварюється, у горизонтальній площині; коливання (вібрації)

зварювального інструменту у вертикальній площині; імпульсна подача зварювального дроту у зварювальну ванну. Аспекти, що потребують уточнення щодо дослідження періодичного впливу: вплив на мікроструктуру наплавленого металу або металу зварного шва коливань за амплітуди від 3,0 мм, що накладені саме на деталь, яка зварюється (наплавляється); вплив на мікроструктуру наплавленого металу або металу зварного шва коливань саме деталі, що наплавляється (зварюється), за діапазоном частот від 1,076 Гц до 4,450 Гц; вплив адитивного типу механічних коливань, що здійснюються одночасно як у горизонтальній, так і у вертикальній площині.

5. Так як дані щодо впливу механічних коливань, які потребують уточнення – діапазон частот від 1,076 Гц до 4,45 Гц були отримані при зварюванні вуглецевої сталі, то дослідження у дисертаційній роботі обумовлені використанням зразків з аналогічного типу металу: СтЗсп. Для даної сталі є раціональним застосування механізованого типу наплавлення (зварювання) у середовищі вуглекислого газу без бідь яких домішок, що обумовлене недоцільністю включення додаткових чинників, які могли б впливати на вивчення аспектів, наведених в п.6 даних висновків.
6. Основні задачі, що потребують вирішення:
 - створення установки для наплавлення з коливаннями виробу, що здійснюються у вертикальній та горизонтальній площинах;
 - розробка моделей, що встановлюють зв'язок параметрів коливань з основними параметрами режиму наплавлення за умов задовільного формування наплавленого металу у випадку накладання обраного виду коливань виробу;
 - розробка моделей, що встановлюють зв'язок параметрів коливань та основних параметрів режиму наплавлення з характеристиками мікроструктури наплавленого металу та металу ЗТВ, службовими властивостями наплавленого металу та геометричними розмірами валиків;

- дослідження впливу коливань на величину періоду горіння дуги, стабільність та енергоємності дуги;
- металографічні дослідження наплавленого металу та металу ЗТВ.

РОЗДІЛ 2

ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИКИ ДЛЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для визначення впливу механічних низькочастотних коливань на наплавлений метал та метал ЗТВ, а також геометричні розміри наплавленого валику розроблено установку, де коливання прикладаються до зварювальної ванни. Основними критеріями вибору складових установки були: доступність на ринку, простота в експлуатації та ремонті (рис. 2.1).

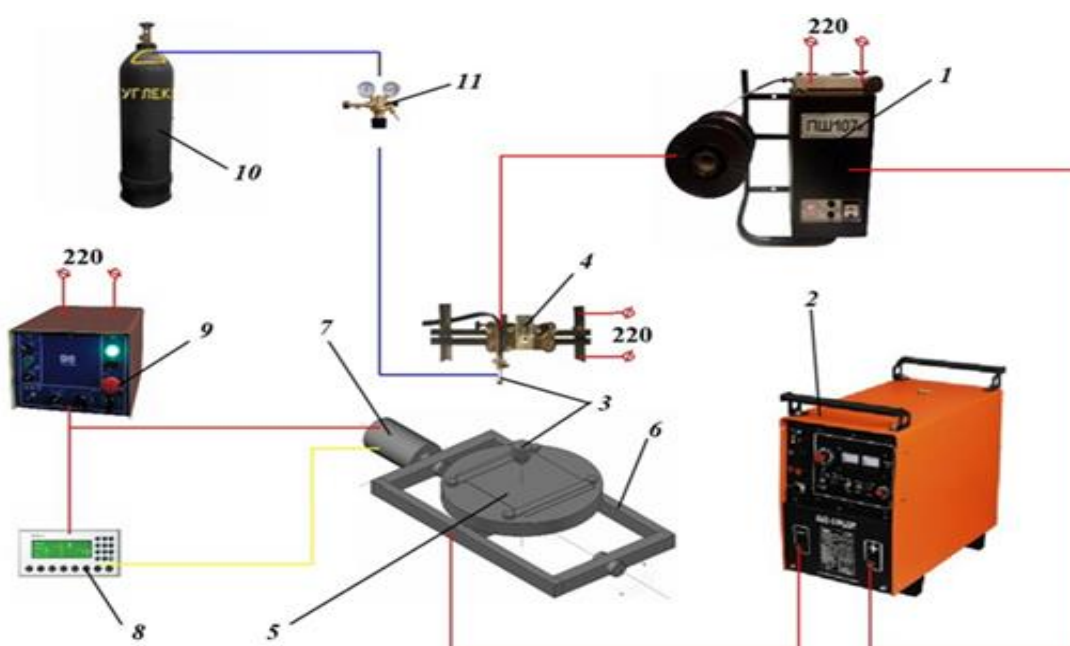


Рисунок 2.1 – Структурна схема установки для наплавлення:
 1 – півавтомат зварювальний, 2 – джерело живлення, 3 – зварювальний пальник,
 4 – рухома станина зварювального пальника, 5 – деталь, що наплавляється,
 6 – рухомий стіл, 7 – кроковий двигун, 8 – пульт керування, 9 – блок керування,
 10 – балон газовий, 11 – редуктор газовий, червоний – силова магістраль,
 синій – газова магістраль, жовтий – магістраль програмування

За загальною схематикою установка складається з силової частини, що забезпечує саме процес наплавлення, частини генерації коливань та частини програмування параметрів коливань.

Процес наплавлення здійснювався зварювальним дротом, що подавався безпосередньо у зону дуги за посередництвом півавтомату зварювального 1. Струм наплавлення регулювався встановленням швидкості подавання електродного дроту відповідними тумблерами на панелі керування півавтомату. Величина струму наплавлення контролювалась завдяки амперметру, що встановлений на лицевій панелі джерела живлення 2. Прямолінійне переміщення зварювального пальника 3 відбувалося завдяки рухомій станині 4, де цей пальник був закріплений. Швидкість наплавлення встановлювалась та регулювалась регулятором швидкості переміщенні каретки на панелі керування станини. Процес коливання деталі, що наплавлялася 5, зображено на рисунку 2.2.

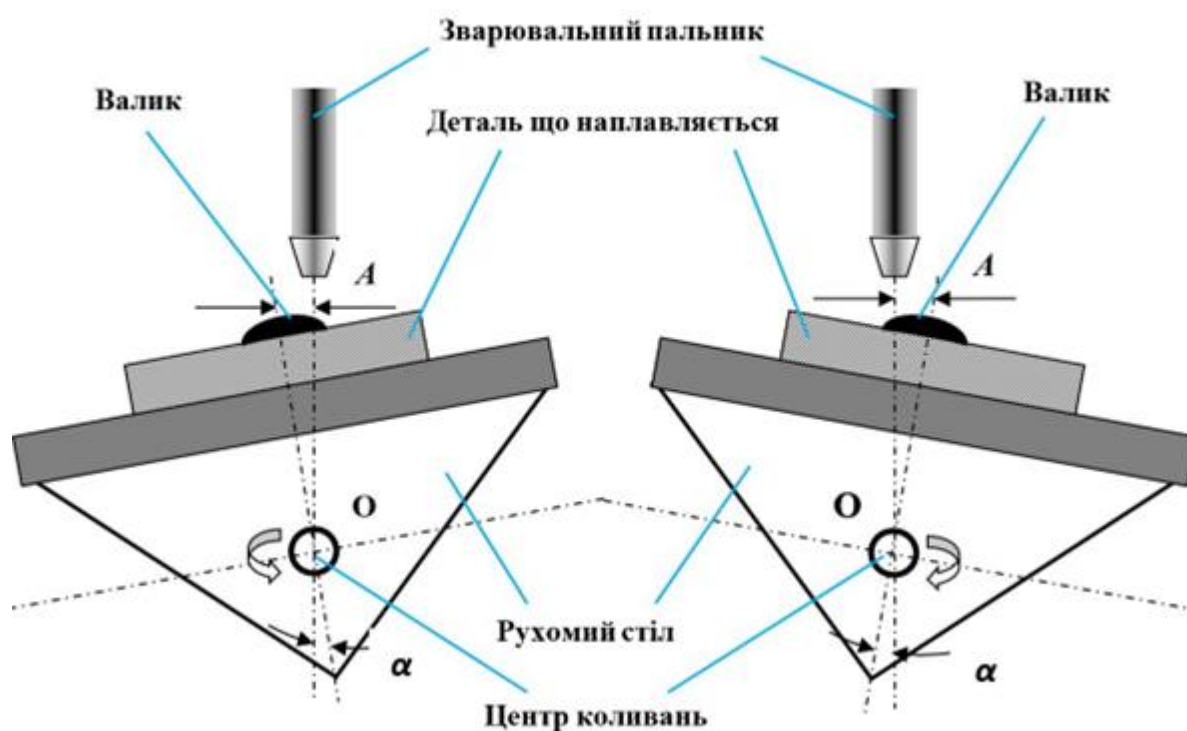


Рисунок 2.2 – Схема поперечних коливань рухомого столу, де A – амплітуда коливань, α – кут відхилення від осі наплавлення, O – центр коливань

Процес коливання відбувався завдяки рухомому столу 6, який мав можливість переміщуватись за дугою окружності з центром O на певний кут α , що мала своїм центром вісь, паралельну осі наплавлення, та крізь яку проходив вал крокового двигуна 7, який і приводив у коливальний стан рухомий стіл 6. Граничне значення кута α визначало величину амплітуди коливання A .

Програмування коливального процесу являє собою задавання величин амплітуди і частоти за посередництвом пульта керування 8, а також подача та переривання електричної напруги на кроковий двигун 7, що здійснювалось блоком керування 9 через відповідні кнопки. Подача газу у зону дуги здійснювалась з газового балону 10, а витрати газу регулювалися редуктором 11.

2.1. Вибір джерела живлення та пристрою подавання електродного дроту

Вибір джерела живлення був обумовлений звичайними вимогами при зварюванні/наплавленні у середовищі захисного газу плавким електродом на постійному струмі не менше за 200,0 А. За наявності було обрано серійний випрямляч ВДГ – 506, який забезпечує струм зварювання/наплавлення за діапазоном від 60,0 А до 500,0 А та регулювання робочої напруги за діапазоном від 18,0 В до 50,0 В на жорсткій ВАХ та має задовільні динамічні властивості щодо забезпечення швидкості збільшення дугової напруги у випадку розімкнення зварювального ланцюга й оптимальної швидкості зростання зварювального струму під час короткого замикання. Обране джерело живлення дозволяє виконувати зварювальні роботи як у ручному режимі, так і механізовано, що визначається вибором відповідної вольт-амперної характеристикою (ВАХ) завдяки перемикачу 9 на лицевій панелі (рис. 2.3). Встановлення та коригування режиму наплавлення здійснюється завдяки регулюванню вихідної напруги тумблером 11 та робочої – тумблером 12. Візуальний контроль напруги здійснюється за посередництвом вольтметра 8. Величина струму наплавлення контролюється за допомогою амперметра 7. Слід зазначити, що дана модель джерела живлення має опцію дистанційного керування завдяки тумблеру 10, яка дозволяє вмикати, вимикати та регулювати зварювальну напругу безпосередньо органами керування півавтомату, однак дана опція у експлуатації установки не була задіяна. Подача електродного дроту діаметром 1,2 мм здійснюється завдяки серійному зварювальному півавтомату ПШ-107В, який призначено для зварювальних робіт порошковим дротом та який забезпечує струм

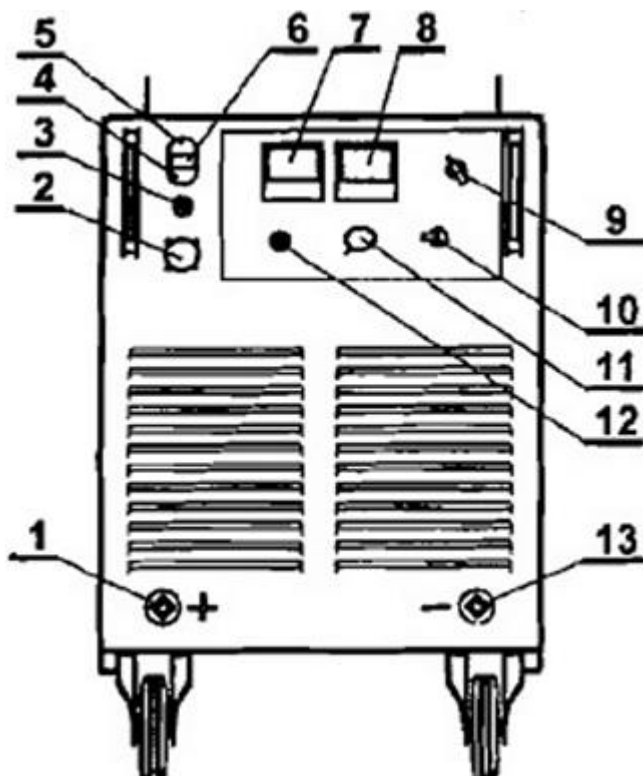


Рисунок 2.3 – Зовнішній вигляд передньої панелі ВДГ – 506: 1, 13 – вихідні роз'єми, 2 – роз'єм для підключення півавтомату, 3 – показчик «Перегрев», 4 – кнопка «Стоп», 5 – кнопка «Пуск», 6 – показчик «Сеть», 7 – амперметр, 8 – вольтметр, 9 – перемикач ВАХ, 10 – тумблер дистанційного керування, 11 – потенціометр керування вихідної напруги, 12 – тумблер попереднього встановлення напруги

зварювання/наплавлення до 400,0 А при використанні дроту діаметром від 1,8 до 3,0 мм. Перед процесом наплавлення суцільним дротом подаючі ролики замінювались на інші, які мали гладкі конічні канавки. Регулювання швидкості обертання роликів щодо регулювання зварювального струму здійснюється як дискретно, так і плавно рукояткою 1 (рис. 2.4). Подача захисного газу у зону дуги відбувалася одночасно з подачею зварювального дроту та переривалась з його зупинкою відповідною кнопкою 2 завдяки газовому відсікачу, яким обладнаний півавтомат. Швидкість подачі дроту контролювалася за допомогою вольтметра 3 та показчику 4. Електричне живлення приводу півавтомату здійснювалось через перетворювач напруги від централізованої мережі 220,0 В.

2.2 Опис конструкції станини

Розроблений макетний зразок станини, який складається з рухомого столу 1 (рис. 2.5), що забезпечує поперечні коливання закріпленого на ньому сталевого зразка відносно осі наплавлення та зварювального пальника 2, який встановлено на

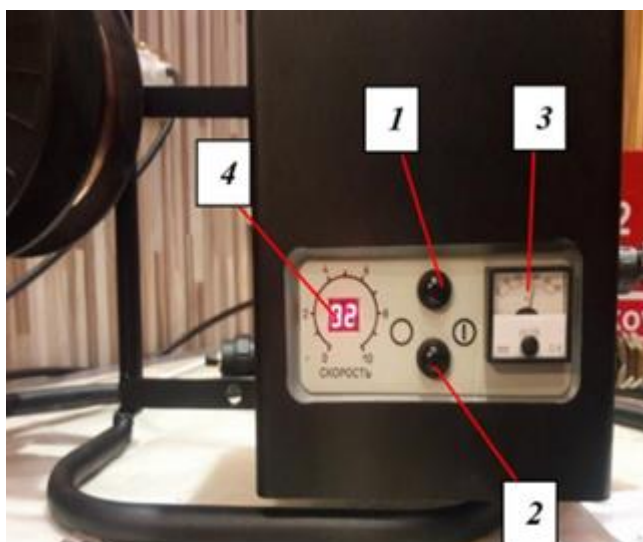


Рисунок 2.4 – Панель керування півавтомату ПШ-107В: 1 – рукоятка регулювання швидкості подачі електродного дроту, 2 – кнопка старту та зупинки подавання електродного дроту, 3 – вольтметр, 4 – покажчик контролю швидкості подачі

наплавляється. Диск має змогу обертатися навколо своєї осі по різьбі, тим самим змінюючи відстань між віссю коливань AB та деталлю, що наплавляється, за діапазоном від 10,0 до 50,0 мм. Під цим диском розташоване посадочне місце 4 для крокового двигуна, що є електроізолюваним. Кроковий двигун 5 забезпечує коливання диску кругом його осі. Даний двигун не встановлювався та вплив таких коливань не досліджувався. Також знизу диска розташовані струмопідводи 6 для підключення до джерела живлення.

Рама кріпиться до бокових сторін короба за посередництвом підшипників 7. З одного боку до рами кріпиться кроковий двигун 8, який забезпечує коливання рами навколо умовної осі AB , що проходить між центрами підшипників. Для забезпечення стійкості процесу коливання, з протилежного боку від крокового двигуна 8 рама має вертикальну направляючу з пазом у вигляді сектора 9. У пазі

рухомій каретці 3, та крокового двигуна 4, закріпленого на одному валу з рухомим столом.

Рухомий стіл являє собою складну конструкцію, яка включає в себе короб та раму. Короб 1 (рис. 2.6) є несучою зварною конструкцією, бокові стінки якої мають посадочні отвори для закріплення рами 2. Конструкція коробу виконана таким чином, щоб він був стійким не тільки у статичному стані, але й забезпечував стійкий стан під час коливального процесу. Рама 2 є також зварною конструкцією, на якій розташований рухомий диск 3 для закріплення деталі, що

знаходиться упор, що є частиною бокової сторони короба і до якої прилягає сектор (на рисунку не показаний).

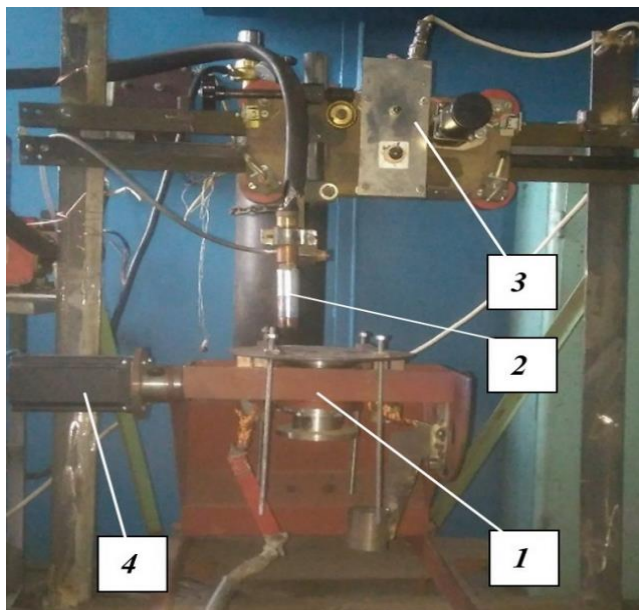


Рисунок 2.5 – Зовнішній вигляд станини та основні її вузли: 1 – рухомий стіл, 2 – зварювальний пальник, 3 – рухома каретка, 4 – кроковий двигун

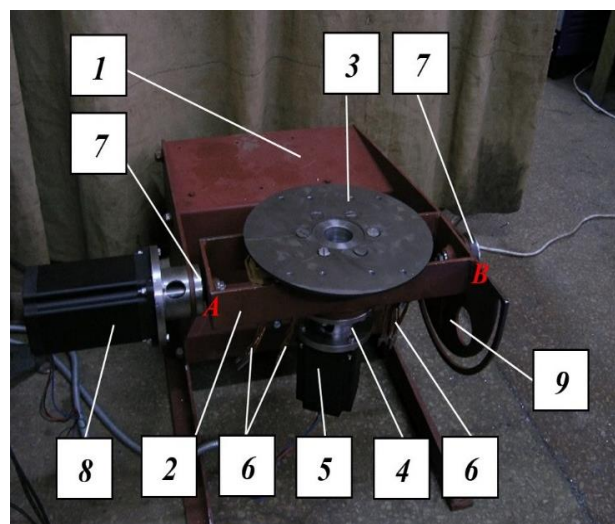


Рисунок 2.6 – Зовнішній вид та основні вузли рухомого столу: 1 – короб, 2 – рама, 3 – диск, 4 – посадкове місце для крокового двигуна, 5 – кроковий двигун, 6 – струмопідводи, 7 – підшипник, 8 – кроковий двигун, 9 – сектор

Рухома каретка, що рівномірно переміщує зварювальний пальник уздовж деталі, закріплена на металевій стаціонарній П-подібній рамі 1 (рис. 2.7). Сам пальник 2 закріплюється на лицевій панелі завдяки штанзі 3, яка має можливість переміщувати пальник у вертикальній площині за посередництвом черв'ячної передачі 4. Переміщення здійснюється вручну рукояткою 5. Швидкість горизонтального переміщення каретки плавно регулюється за діапазоном від 0 м/год до 26,0 м/год. відповідною рукояткою 6, яка регулює оберти електродвигуна приводу 7. Пуск та зупинка, а також напрямок руху каретки задається перемикачем 8. Електричне живлення каретки відбувається через перетворювач напруги від централізованої мережі 220,0 В за допомогою кабелю 9.

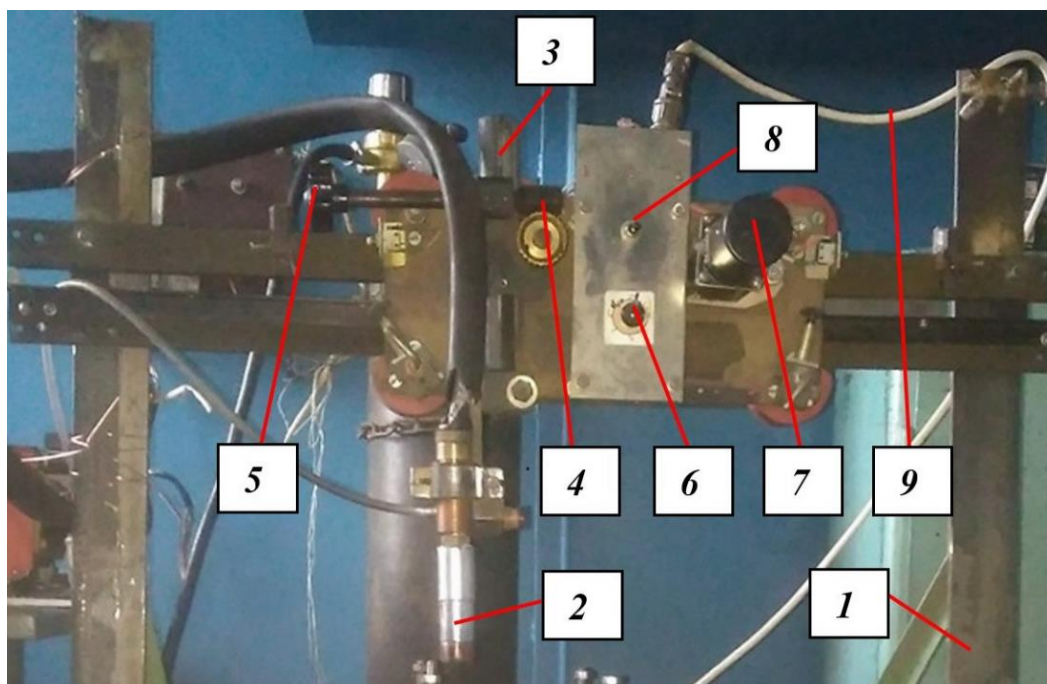


Рисунок 2.7 – Зовнішній вид та основні вузли рухомої каретки: 1 – П- подібна рама, 2 – пальник зварювальний, 3 – штанга, 4 – черв'ячна передача, 5 – рукоятка, 6 – регулятор швидкості переміщення каретки, 7 – електропривод, 8 – перемикач напрямку руху, 9 – кабель електричного живлення

2.3 Вибір крокового двигуна та опис системи його керування

Відповідно до вирішення задачі коливання зварювальної ванни, на сьогоднішній день найбільш підходять сервоприводи та крокові двигуни. Основна відмінність цих типів електроприводів полягає у наявності зворотного зв'язку, якого крокові двигуни не мають. Завдяки цьому, в сервоприводах відсутні такі недоліки, як проскакування при перенавантаженнях та втрата позиціонування. З іншого боку, сервоприводи нестійкі у роботі на низьких оборотах та мають меншу точність позиціонування у порівнянні з кроковими двигунами. Крім того, наявність зворотного зв'язку ускладнює конструкцію та здорожчує експлуатацію устаткування на базі сервоприводу. Таким чином, відповідно до вирішення задач, що ставляться у даній дисертаційній роботі, найбільш виправданим є використання саме крокового двигуна, як більш дешевого, простого та надійного у експлуатації генератора низькочастотних гармонійних коливань зварювальної ванни.

Методика вибору двигуна є комплексною та включає в себе вибір саме двигуна, драйверу та їх джерела живлення.

Двигун обирався за динамічним моментом системи M_∂ з урахуванням статичної та динамічної складових за виразом:

$$M_\partial - M = J \cdot \frac{d\omega}{dt}, \quad (2.1)$$

де M – значення складової моменту у різні проміжки періоду коливань зварювальної ванни та рухомих частин столу масою m , Н·м; J – момент інерції системи, $\text{м}^2 \cdot \text{кг}$; ω – кутова швидкість, рад/сек; $\frac{d\omega}{dt}$ – кутове прискорення, рад/сек², що визначається заданим законом коливального руху поперек осі коливання O (рис. 2.8) $y(t) = A \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot \nu \cdot t - \varphi_0)$ та відстанню l_k від центра мас розплаву зварювальної ванни C до осі коливань O , м; A – амплітуда коливання, м; ν – частота коливань, Гц; φ_0 – початкова фаза перед виходом на стаціонарний режим роботи від початкового стану. В даному дослідженні прийнято $\varphi_0 = -\frac{\pi}{2}$. Момент M обумовлено дією складової F , м сили тяжіння частин системи P при відхиленні зварювальної ванни на певний кут α в процесі коливання, а також моментом M_{mp} завдяки силі тертя кочення у підшипниках.

Тоді, якщо вважати, що маса цих частин зосереджена у центрі розплаву, можна записати вираз:

$$M = M_{mp} \pm l_k \cdot F = M_{mp} \pm l_k \cdot P \cdot \sin \alpha, \quad (2.2)$$

знак плюс відповідає тому напрямку руху, коли система рухається від центру коливань, мінус – у зворотному напрямку. Відповідно до схеми:

$$\sin \alpha = \frac{y(t)}{l_k} = \frac{A \cdot \sin\left(2 \cdot \pi \cdot \nu \cdot t - \frac{\pi}{2}\right)}{l_k} = \frac{A \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot \nu \cdot t)}{l_k}, \text{ тоді кінцевий вираз для } M \text{ буде}$$

мати вигляд:

$$M = M_{mp} \pm l_k \cdot F = M_{mp} \pm l_k \cdot m \cdot g \cdot \frac{A \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot \nu \cdot t)}{l_k} = M_{mp} \pm m \cdot g \cdot A \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot \nu \cdot t). \quad (2.2')$$

де g – прискорення вільного падіння, м/сек².

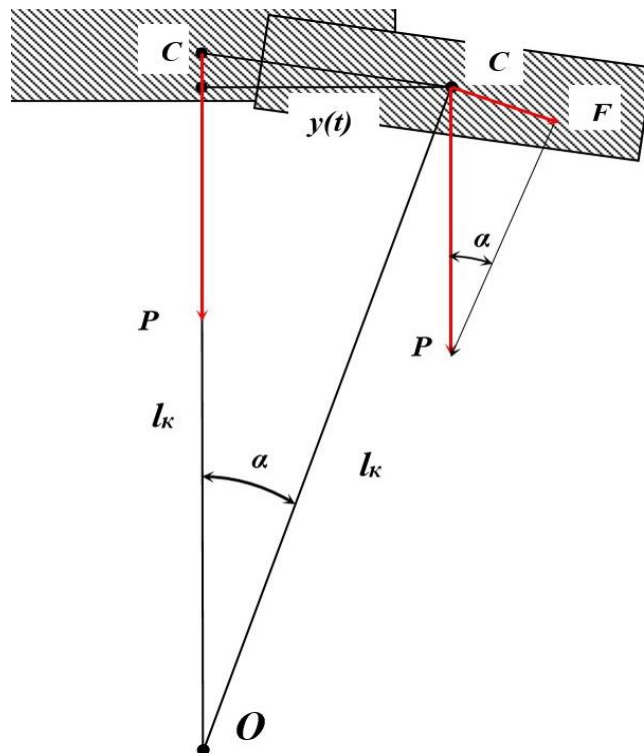


Рисунок 2.8 – Схема впливу сили тяжіння P на центр мас розплаву C зварювальної ванни при повороті деталі на кут α

При розгляданні рухомої частини станини масою m , де також закріплена деталь, що наплавляється, і яка періодично рухається навколо осі обертання на відстані l_k за законом $y(t)$ за траєкторією дуги окружності, буде мати місце вираз:

$$\begin{aligned} \left| J \cdot \frac{d\omega}{dt} \right| &= l_k^2 \cdot m \cdot \frac{1}{l_k} \cdot \frac{dy^2}{dt^2} = l_k \cdot m \cdot 4 \cdot A \cdot \pi^2 \cdot \nu^2 \cdot \sin\left(2 \cdot \pi \cdot \nu \cdot t - \frac{\pi}{2}\right) = \\ &= l_k \cdot m \cdot 4 \cdot A \cdot \pi^2 \cdot \nu^2 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot \nu \cdot t). \end{aligned} \quad (2.3)$$

Максимальне значення моменту на валу двигуна повинно визначатися у моменти часу $t = \frac{k}{2 \cdot \nu}$, де k будь яке натуральне число, тоді кут α буде максимальним, тобто $\sin \alpha = \frac{A}{l_k}$. За зазначених умов найбільше значення моменту

M_{max} на валу двигуна буде визначатися за виразом:

$$M_{\text{max}} = 4 \cdot A \cdot l_k \cdot \pi^2 \cdot \nu^2 \cdot m + m \cdot g \cdot A - M_{\text{mp}}, \quad (2.4)$$

а за півперіод:

$$M_0 = 4 \cdot A \cdot l_k \cdot \pi^2 \cdot \nu^2 \cdot m + m \cdot g \cdot A - m \cdot g \cdot A - M_{mp} = 4 \cdot A \cdot l_k \cdot \pi^2 \cdot \nu^2 \cdot m - M_{mp}. \quad (2.4')$$

Значення M_{mp} визначається за формулою [63]: $M_{mp} = \frac{3}{2} \cdot \mu \cdot m \cdot g \cdot D_n$, де D_n – зовнішній діаметр підшипника, м; μ – коефіцієнт тертя.

Значення параметрів, що відповідають максимальним, які входять до формули (2.4), є наступними: $A = 0,007$ м, $l_k = 0,07$ м, $\nu = 4,5$ Гц, $m = 5,0$ кг, $D_n = 0,040$ м, $\mu = 0,003$. Тоді, з урахуванням сили тертя у 2-х підшипниках, значення M_{max} буде дорівнювати:

$$M_{\text{max}} = 4 \cdot A \cdot l_k \cdot \pi^2 \cdot \nu^2 \cdot m + m \cdot g \cdot A - 2 \cdot M_{mp} = 4 \cdot 0,007 \cdot 0,07 \cdot \pi^2 \cdot 4,5^2 \cdot 5,0 + 5,0 \cdot 9,81 \cdot 0,007 - 2 \cdot \frac{3}{2} \cdot 0,003 \cdot 5,0 \cdot 9,81 \cdot 0,04 \approx 2,28 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Таким чином, слід обирати кроковий двигун із значенням динамічного моменту $M_{\text{max}} \geq 2,28 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Відповідно до отриманого результату, було обрано 2-фазний двигун *Kinco 2S86Q-051F6* гібридного типу, що дозволяє задавати менший розмір кроку. Дана модель крокового двигуна дозволяє отримати максимальне значення динамічного моменту завдяки подачі на обмотки його статора напруги U_{cm} відповідної величини (рис. 2.9 [64]): близько 3,5 Н·м при $U_{cm} = 24,0$ В, 7,5 Н·м при $U_{cm} = 48,0$ В та 8,9 Н·м при $U_{cm} = 60,0$ В. Максимальне (порогове) значення крутного моменту – 12,8 Н·м, що дозволяє здійснювати коливання маси до 16,0 кг.

За корисним навантаженням на валу двигуна порогові значення є: 60,0 Н осьового навантаження; 220,0 Н – радіального.

Вибір драйверу здійснювався за значеннями фазного струму крокового двигуна I_{kdf} та напруги живлення $U_{жд}$.

Зазвичай драйвер повинен забезпечувати струм I_{dp} , що відповідає співвідношенню $\frac{I_{dp}}{I_{kdf}} = (0,15 - 0,4)$, яке обумовлено ймовірною потребою збільшення величини крутного моменту. Значно перевищує значення I_{dp} буде однією з причин значної вібрації.

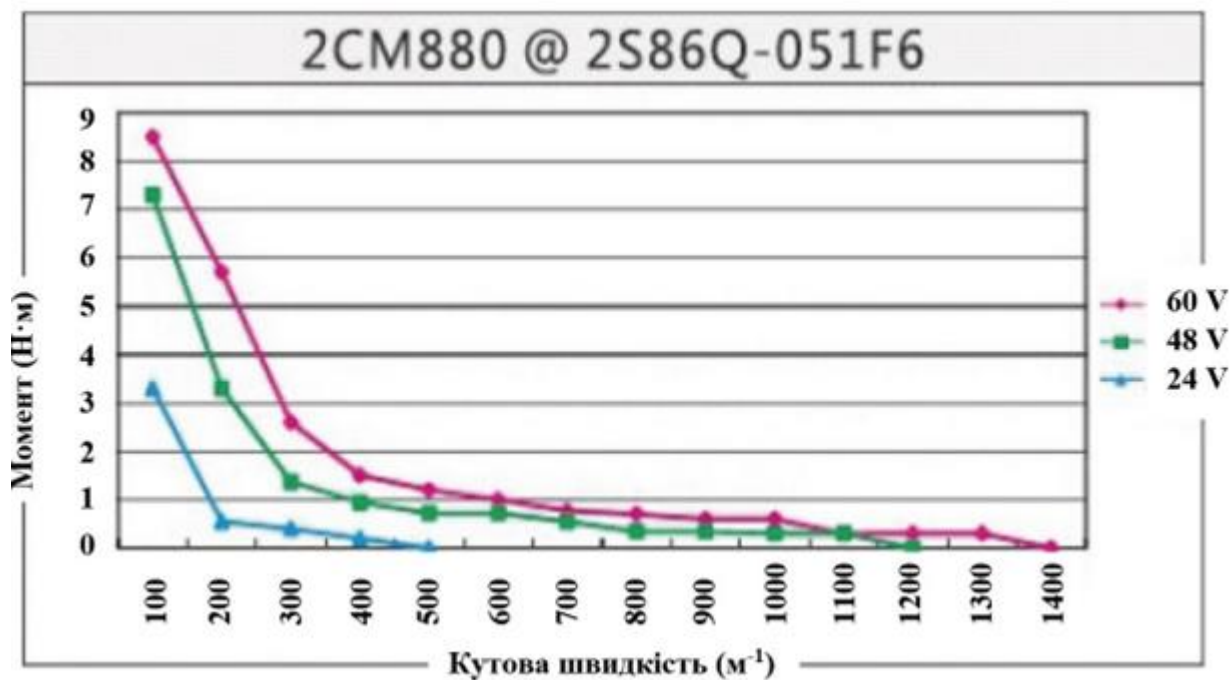


Рисунок 2.9 – Залежність крутного моменту на валу крокового двигуна від кутової швидкості [64]

Значення $U_{жсд}$ впливає на динаміку на високих обертах, вібрацію та нагрів як двигуна, так і драйвера. Тому рекомендовано обирати величину $U_{жсд}$ у межах $10,0 \cdot I_{др} \pm 15,0\% \leq U_{жсд} \leq 32,0 \cdot \sqrt{L_{кд}}$, де $L_{кд}$ – індуктивність обмотки статора крокового двигуна, мГн.

Для обраного крокового двигуна необхідні значення є [64]: $I_{кдф} = 6,0$ А; $L_{кд} = 10,0$ мГн, що дозволяє обрати двофазні драйвери *Kinco* моделей 2CM880 або 2M880N у яких $I_{др} = 8,0$ А, $U_{жсд} = 70,0$ В. Різниця між ними полягає у ступені точності, тобто кількості мікрокроків на 1 оберт. Модель 2CM880 забезпечує більшу точність та відповідно дорожча, тому була обрана модель 2M880N [65].

Даний драйвер розрахований на 256 мікрокроків та виконаний на *PLC* одночиповому процесорі керування, який забезпечує імпульсне живлення крокового двигуна за алгоритмом векторного керування (*vector current control algorithm*), що обумовлює зменшення шуму та вібрації до рівня сервоприводу. До особливостей даної моделі відносяться підтримка таких функцій, як-от: автоматичне регулювання електричних параметрів, що подаються на котушки

статору крокового двигуна у відповідності з його електричним опором та індуктивністю; самотестування; фазова пам'ять; підтримка *PLC+DIR* та *CW/CCW* протоколів сигналів керування; *half-current* режиму. Окрім того, для запобігання електричного пробую драйвер забезпечений опторозв'язними входами з підтримкою імпульсної частоти відгуку 400,0 Гц, а також функціями захисту від перенавантаження по напрузі та струму, недовантаження по напрузі, а також – перегріву.

Джерело живлення для крокового двигуна обиралося за критеріями струму та напруги.

За конструктивним виконанням обиралося імпульсне джерело живлення, яке повинно було мати вихідну величину сили струму $I_{джж}$, що задовольняє

відношенню $\frac{I_{джж}}{I_{кдф}} \approx (0,15-0,3)$. Вихідна напруга джерела живлення $U_{джж}$

обиралася у відповідності максимальному значенню крутного моменту $M_{мах}$ за допомогою відповідного графіку (рис. 2.9).

У відповідності з вищезначеним було обрано імпульсне однофазне джерело живлення *Mean Well DRP-240-24* з $I_{джж} = 10,0$ А, $U_{джж} = 24,0$ В. Дане джерело працює за діапазоном вхідної напруги від 85,0 В до 264,0 В, має активний та пасивний коректори коефіцієнту потужності, а також захист від короткого замкнення, перегріву та перенавантаження як по струму, так і по напрузі [66].

Система керування кроковим двигуном реалізована у блоці керування (рис. 2.1, поз. 9), яка створена на базі контролера ПЛК *Kinco-K306-24AT* та схематично зображена на рис. 2.10.

Модель контролера обиралася у відповідності до електричних параметрів джерела живлення та відповідно до них має 14 входів та 10 виходів на 24,0 В постійного струму. Сам контролер ПЛК має напругу живлення за діапазоном від 85,0 В до 265,0 В при змінному струмі та живиться від мережі 220,0 В [67]. Основним критерієм вибору була можливість керування 2-ма кроковими двигунами, що було обумовлено вимогами до конструкції даної установки. І хоча

дана можливість не використовується у дисертаційній роботі, цей контролер має можливість керувати саме 2-ма кроковим двигунами за рахунок наявності 2-ох імпульсних генераторів з частотою до 20,0 кГц кожний. Програмування контролеру здійснювалось за допомогою персонального комп'ютера та програмного забезпечення *KincoBuilder*.



Рисунок 2.10 – Схема керування кроковим двигуном М

Для запобігання пошкодження двигуна від помилкових даних та програмних збоїв використовувався модуль розширення вводу – виводу *Kinco-K331-04IV* та блок опорної напруги з діапазоном від 0 В до 10,0 В, що дозволяло контролювати керуючий струм за діапазоном від 0 А до 20,0 мА та напругу до 10,0 В [67].

Пуск та зупинка крокового двигуна виконувалися кнопками «пуск» та «стоп» відповідно на лицевій панелі блоку керування, а вибір параметрів режиму роботи здійснювався завдяки пульта програмування *Kinco MD 224L*. Параметрів, що задаються на пульті є 3: a – значення кутового прискорення валу від точки зупинки, імпл/мкс²; imp – кількість імпульсів повороту валу двигуна за такт – час $\frac{1}{2}$ періоду коливання, тобто час між двома крайовими положеннями валу крокового двигуна,

що визначають розмах коливання; $time$ – час між імпульсами, мкс (рис. 2.11). Імпульси формуються завдяки мікроімпульсному режиму, тривалість мікроімпульсів лежить у межах від 1,0 до 25,0 мкс. Кількість мікроімпульсів у імпульсі та їх тривалість визначається драйвером відповідно до внесених даних.

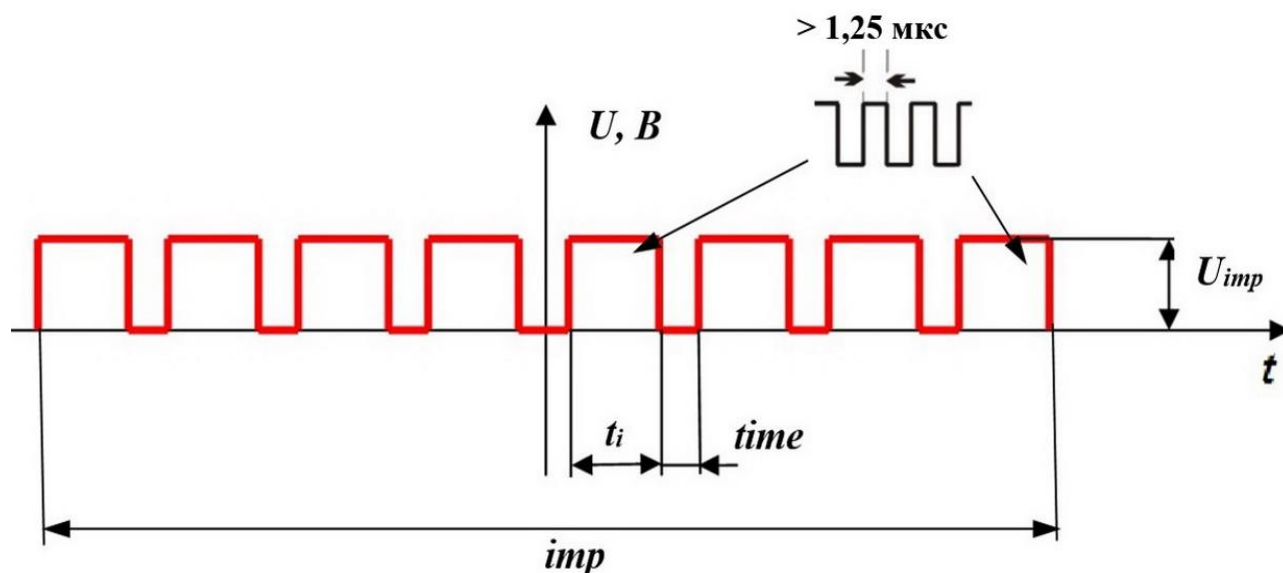


Рисунок 2.11 – Циклограма режиму роботи крокового двигуна за час такту: U_{imp} – керуючий імпульс напруги; t_i – час імпульсу; $time$ – час паузи; imp – кількість імпульсів у такті

Таким чином, кроковий двигун, що генерує необхідну частоту коливання та задає значення розмаху коливання, відповідно має п'ять режимів роботи: **1** – $a = 5,0$ імп/мкс², $imp = 25,0$, $time = 50,0$ мкс; **2** – $a = 5,0$ імп/мкс², $imp = 25,0$, $time = 750,0$ мкс; **3** – $a = 5,0$ імп/мкс², $imp = 85,0$, $time = 475,0$ мкс; **4** – $a = 5,0$ імп/мкс², $imp = 85,0$, $time = 800,0$ мкс; **5** – $a = 10,0$ імп/мкс², $imp = 95,0$, $time = 990,0$ мкс. Режим 1 відповідає частоті коливань ванни у 4,5 Гц; режим 2 – у 4,0 Гц; режим 3 – у 3,5 Гц; режим 4 – у 3,0 Гц; режим 5 – у 2,5 Гц.

2.4 Підготовка зварювальних матеріалів та зразків

Заготовки для наплавлення являють собою металеві пластини товщиною 8,0 мм з листової сталі марки Ст3сп, яка за хімічним складом відповідає

ДСТУ 2651:2005 «Сталь вуглецева звичайної якості. Марки». Розміри заготовок не були сталими та становили в середньому за шириною 35,0 мм, за довжиною 220,0 мм.

Для наплавлення на зразки за середнім розміром 220,0 мм × 35,0 мм × 8,0 мм зі СтЗсп у якості плавкого електроду рекомендовано застосовувати дріт діаметром від 0,8 мм до 1,4 мм [68]. Для запобігання утворенню пор у наплавленому металі при використанні газового середовища CO_2 необхідно мати у складі електродного дроту підвищену кількість розкислювачів, зокрема кремнію і марганцю [69]. Так як якість наплавленого металу залежить від співвідношення вмісту кремнію і марганцю, найкраще обирати марки електродного дроту, де співвідношення вмісту марганцю до кремнію буде в межах від 1,5 рази до 2,0 раз [70]. На підставі цих рекомендацій у якості плавкого електроду було обрано суцільний зварювальний дріт діаметром 1,2 мм марки ER70S-6 (C: від 0,06 % до 0,15 %; Si: від 0,80 % до 1,15 %; Mn: від 1,40 % до 1,85 %; P: не більше 0,025 %; S: не більше 0,025 %; Ni: не більше 0,15 %; Cr: не більше 0,15 %; Mo: не більше 0,15 %; V: не більше 0,03 %; Cu: не більше 0,50 %; Fe: інше [71]), що є аналогом дроту Св-08Г2С. Дріт зберігався та використовувався за рекомендаціями виробника у відповідності до «Вимог до вихідних матеріалів, заготовок, їх зберігання та транспортування» ДСТУ 2456 – 94. Використання дроту такого типу повинно забезпечити отримання наплавленого металу високої якості з твердістю від 220,0 НВ до 250,0 НВ (від 2158 МПа до 2452,0 МПа) [68].

Захисний газ є діоксид вуглецю скраплений першого сорту, що відповідає за хімічним складом та терміном придатності до «Діоксид вуглецю газоподібний і скраплений. Технічні умови» ДСТУ 4817:2007, який поставляється та зберігається у газових балонах відповідно до ДСТУ 2456 – 94.

Перед наплавленням кожна заготівля була очищена від бруду та іржі шляхом відповідної поверхневої обробки на шліфмашині з подальшою обробкою торців на точильному верстаті. Наступною операцією була поверхнева обробка ацетоном для

знежирення поверхні. Очищення здійснювалось з обох боків заготівлі відповідно до ДСТУ 2456 – 94.

Місце закріплення заготівлі на рухомому столі та притискні планки очищувались від залишків металевих бризок, що залишалися від попереднього процесу наплавлення, шляхом обробки напилком з подальшим протиранням ганчіркою, змоченою ацетоном.

2.5 Налаштування параметрів наплавлення та вимірювання електричних параметрів дуги

Налаштування та вимірювання параметрів наплавлення

Регулювання величини сили струму наплавлення I_n здійснювалось шляхом встановлення відповідного значення швидкості подавання електродного дроту, що здійснювалось відповідними елементами на панелі керування півавтомату ПШ – 107В (рис. 2.4). Швидкість подавання дроту визначалась за виразом [72]:

$$V_n = \frac{4 \cdot \alpha_p \cdot I_n}{60 \cdot \pi \cdot d_e^2 \cdot \rho}, \quad (2.5)$$

де $\alpha_p = 3,0 + 0,08 \cdot \frac{I_n}{d_e}$ – коефіцієнт розплавлення металу дроту, г/(А·год); d_e – діаметр електродного дроту, мм; $\rho = 7,8$ г/см³ – щільність металу електродного дроту.

Візуальний контроль струму наплавлення продовж процесу наплавлення здійснювався за амперметром, що розташований на передній панелі джерела живлення (рис. 2.3).

Величина напруги на дузі U_d встановлювалась тумблером попереднього встановлення напруги, а регулювання напруги під час наплавлення здійснювалось потенціометром керування. Візуальний контроль напруги здійснювався за вольтметром, розташованим на передній панелі джерела живлення (рис. 2.3). Значення U_d визначалось у відповідності до значення I_n та діаметру електродного дроту d_e за виразом [73]:

$$U_{\partial} = 20 + \frac{50 \cdot 10^{-3}}{d_e^2} \cdot I_n \pm 1. \quad (2.6)$$

Величина швидкості наплавлення встановлювалася та регулювалася регулятором швидкості переміщення каретки у відповідності до шкали на лицевій панелі рухомої каретки (рис. 2.7).

Величина витрати захисного газу встановлювалася та регулювалася рукояткою газового редуктора (рис. 2.1).

Амплітуда коливання A визначалася як величина, менша у 2,0 рази за розмах коливання $L = 2 \cdot A$, та вимірювалася за довжиною сліду, що залишає кінець нерухомого зварювального дроту, що торкається поверхні деталі при коливаннях зразка. Після закріплення деталі виліт дроту встановлювався таким, щоб він торкався поверхні заготовлі, після чого запускався кроковий двигун на термін від 10,0 с до 15,0 с. По довжині сліду, що залишав за собою електрод, вимірювався розмах коливання L , та, відповідно, й амплітуда A за формулою $L = 2 \cdot A$. Значення амплітуди регулювалось за допомогою зміни відстані від осі коливання до поверхні зварювальної ванни l_k шляхом розміщення технологічної підкладки відомої товщини між поверхнею зварювального столу та заготовкою (рис. 2.12).

Частота коливань визначалася вимірювачем параметрів вібрації Октава-101ВМ, що відповідає ДСТУ ГОСТ 16519:2008 «Вібрація. Визначення параметрів вібраційної характеристики ручних машин і машин з ручним керуванням. Загальні вимоги». Вимірювання здійснювалось у відповідності до інструкції з експлуатації [74].

Вимірювання електричних параметрів дуги

Вимірювання струму та напруги дуги здійснювалось шляхом запису осцилограм за допомогою спеціалізованого комплексу для моніторингу процесу зварювання на базі АЦП *L-Card*, що забезпечує безперервне введення сигналів на частотах дискретизації від 0,122 кГц до 100,0 кГц.

Вимірювання струму здійснювалось за допомогою датчика *LEM LA-300 / I*, а напруги – *LEM LV25 P / U*, які забезпечують гальванічну розв'язку сигналів і

вимірювання струму до 300,0 А, а напруги до 500,0 В. Програмне забезпечення системи *IMS2006* створено в середовищі графічного програмування *LabVIEW*, що дозволяє записувати сигнали датчиків на жорсткий диск комп'ютера і виконати необхідну обробку [75].

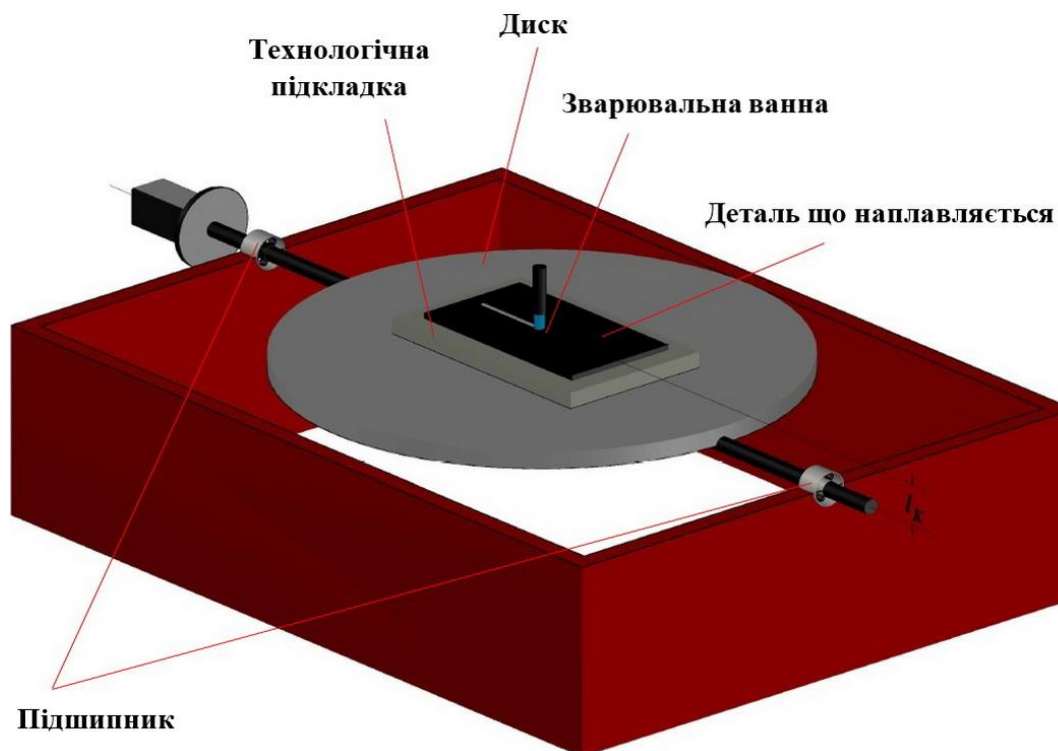


Рисунок 2.12 – Загальна схема щодо встановлення величини амплітуди коливань A , де l_k – відстань від осі коливань до центру мас розплаву

2.6 Порядок проведення наплавлень

Після вмикання обладнання, подачі газу та встановлення і перевірки значень сили струму, напруги на дузі, швидкості наплавлення, вильоту електроду, – який встановлювався у межах від 8,0 мм до 15,0 мм [76], витрати газу, амплітуди та частоти коливань зварювальної ванни – вмикався тумблер ходу рухомої каретки зі зварювальним пальником, через термін від 2,0 с до 5,0 с вмикалася подача зварювального дроту й загоралася дуга. Якщо дуга горіла стабільно, то через термін від 3,0 с до 6,0 с від початку підпалу вмикався кроковий двигун – здійснювався процес наплавлення. Після отримання наплавленого валику, по досягненню

відстані за діапазоном від 1,0 см до 2,0 см від притискної планки, вимикався рух рухомої каретки, потім вимикалася подача електродного дроту через термін від 1,0 с до 2,0 с, після цього вимикався кроковий двигун. Захисний газ подавався в зону наплавлення ще від 10,0 с до 20,0 с, а потім вимикався. По закінченню експерименту вимикалося з електричної мережі усе обладнання. Наплавлена деталь знаходилася притиснутою до поверхні столу до повного охолодження. Після того, як температура зразку стане близькою до кімнатної, він знімався з рухомого столу й шліфувався дисковою щіткою з джгутами з нержавіючої сталі.

2.7 Методика визначення ступеню розбризкування

Встановлення ступеню розбризкування Ψ здійснювалось за наступною методикою:

- зважувалась пластина до наплавлення ($P_{\text{пластини}}$);
- зважувалась пластина після наплавлення ($P_{I_{\text{наплавлення}}}$);
- рештки металу, що опинились на поверхні деталі та валику після наплавлення, видалялися механічним шляхом та пластина зважувалась повторно ($P_{2_{\text{наплавлення}}}$);
- зважувалась бухта з дротом до і після наплавлення та визначалась різниця ($P_{\text{дроту}}$).

Розбризкування визначалось на різниці оцінки різниці ваги витраченого зварювального дроту і отриманого валика:

$$\Psi = \frac{P_{I_{\text{наплавлення}}} - P_{2_{\text{наплавлення}}}}{P_{\text{дроту}}} \cdot 100. \quad (2.7)$$

2.8 Методика виявлення границь зерен та мікроструктури наплавленого металу

Отримання мікрошліфа здійснювалось у відповідності з методом травлення, що відповідає ДСТУ 8972:2019 «Сталі та сплави. Методи виявлення та визначення величини зерна»:

- Вирізання. З середини кожного зразка поперек осі наплавленого валика вирізалася ділянка шириною за діапазоном від 10,0 мм до 17,0 мм на дисковому верстаті з використанням охолоджуючої рідини.
- Шліфування. У результаті шліфована поверхня була оброблена до стану попереднього шліфування та мала 7 клас шорсткості. Тонке шліфування поверхні забезпечило 10 клас шорсткості.
- Полірування. Полірування виконувалося у 2 стадії, що забезпечило 14 клас шорсткості поверхні.
- Хімічне травлення. Виконувалось зануренням кожного зразка у 4,0 % спиртовий розчин азотної кислоти на термін від 5,0 с до 10,0 с. Після цього зразки просушувалися при кімнатній температурі.

2.9 Методики вимірювання величин розміру кристаліта, твердості, геометричних розмірів наплавлених валиків

Всі металографічні дослідження, а також вимірювання геометричних розмірів наплавлених валиків виконувались на мікроскопі *NEOPHOT-32*, а зображення мікроструктур було отримано за допомогою цифрової фотокамери *Olympus*.

У даній дисертаційній роботі кристалітом вважається окремий кристал полікристалічного конгломерату, що обмежений суміжними поверхнями – границями зерна. Величина зерна визначалась як середній умовний діаметр зерна за методом підрахунку перетину границь зерен відповідно до ДСТУ 8972:2019. Значення середнього умовного діаметру зерна визначалося в його мінімальному, максимальному та середньому значенні у заданій зоні.

Значення твердості вимірювалося за методом Вікерса твердоміром *LECO M – 400* з величиною навантаження індентора на метал 1,0 кгс відповідно до методики ДСТУ *ISO 6507-1:2007* «Матеріали металеві. Визначення твердості за Вікерсом. Частина 1. Метод випробування».

Виміри здійснювались у наплавленому металі у верхній, середній та кореневій частині валика, а величина твердості металу ЗТВ вимірювалась на поверхні

основного металу, у його середині, а також у нижній частині вздовж лінії сплавлення (рис. 2.13). Відповідно вимірювалась твердість ЗТВ на ділянці великого зерна (ДВЗ), ділянці дрібного зерна (ДДЗ) та ділянці неповної перекристалізації (ДНП).

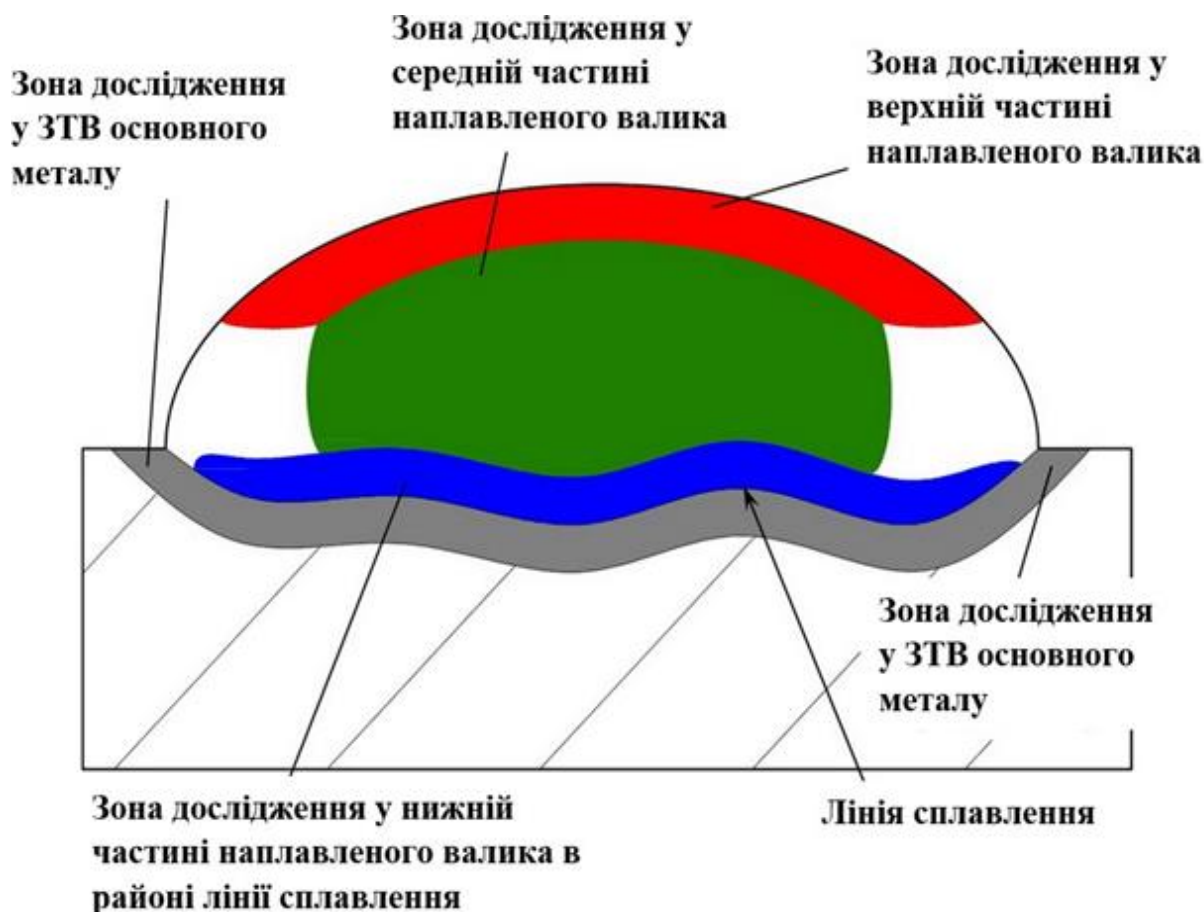


Рисунок 2.13 – Схема зон виміру величин твердості та розміру кристаліту наплавленого металу, а також твердості металу ЗТВ

Вимірювання геометричних розмірів наплавлених валиків – висоти та ширини – здійснювалось відповідно до вимог ДСТУ-Н Б А.3.1-11:2008 «Управління, організація і технологія. Настанова з візуального і вимірювального контролю зварних з'єднань та наплавлень металевих конструкцій».

Значення ширини валика W визначалося як відстань між граничними точками лінії сплавлення, що лежать на поверхні основного металу по обидва боки валику (рис. 2.14). Значення висоти визначалося як відстань від найвищої точки валика до

лінії сплавлення. Точки на лінії сплавлення обиралися з краю (b_1, b_3) та у центрі (b_2) кристаліту наплавленого металу, а також твердості металу ЗТВ.

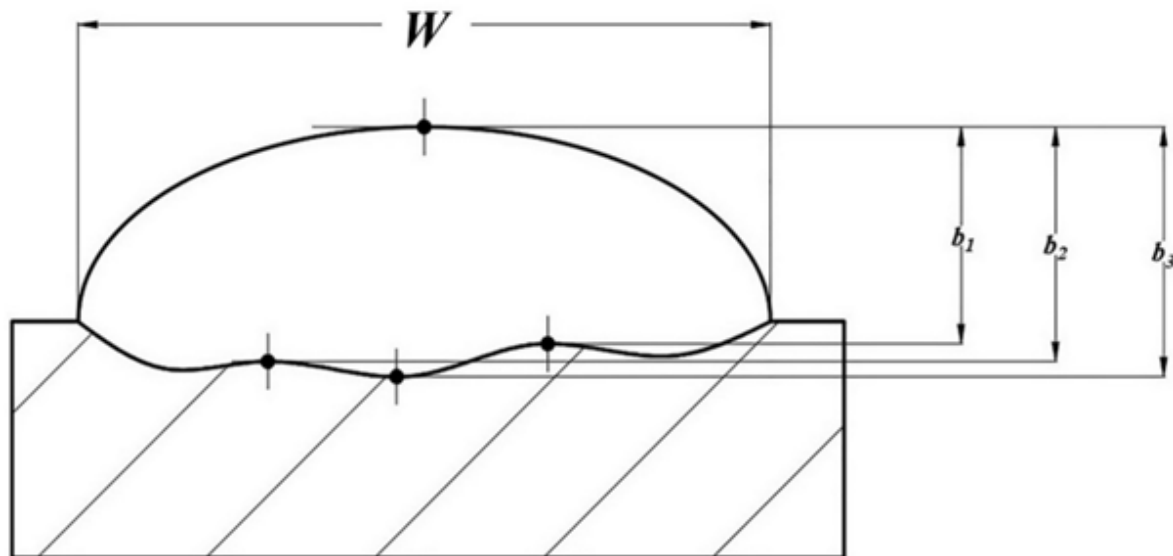


Рисунок 2.14 – Схема виміру величин висоти b та ширини W

2.10 Висновки до розділу 2

1. Створена установка для реалізації способу наплавлення в середовищі CO_2 з низькочастотними коливаннями зварювальної ванни. Її основні вузли є доступними за ціною та надійними у експлуатації. Характерною інновацією є функція генерації поперечних коливань зварювальної ванни за траєкторією вздовж дотичної до дуги окружності.
2. Наведено методику вибору крокового двигуна за максимальним крутним моментом у 2,28 Н·м, що дозволяє здійснювати коливання системи з масою до 16,0 кг. За електромагнітними параметрами двигуна були обрані драйвер та джерело живлення, на базі чого створена система керування кроковим двигуном з функцією програмування.
3. Визначені режими роботи двигуна, що генерують коливання за заданим амплітудно-частотним діапазоном: частоти від 2,5 Гц до 4,5 Гц, амплітуди від 3,0 мм до 7,0 мм, та створено рухомий стіл, за посередництвом якого ці коливання передаються до деталі, що наплавляється.

4. Описано типові методи досліджень, що використовуватимуться:
- метод визначення ступеню розбризкування;
 - метод травлення для виявлення границь зерен та мікроструктури наплавленого металу та металу ЗТВ;
 - методи оптичної та растрової мікроскопії для визначення загального виду мікроструктури та типу її структурних складових, геометричних розмірів валиків;
 - метод підрахунку перетину границь зерен для визначення їх розміру;
 - метод Вікерса для визначення твердості наплавленого металу та металу ЗТВ.

РОЗДІЛ 3

ВПЛИВ КОЛИВАНЬ ЗВАРЮВАЛЬНОЇ ВАННИ НА ОСНОВНІ ПАРАМЕТРИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

3.1 Зв'язок амплітудно – частотних характеристик з швидкістю наплавлення

Визначаючи силу струму I_n та швидкість V_n наплавлення, як незалежні між собою та від будь яких інших факторів параметри режиму, проводились аналітичні дослідження щодо визначення зв'язку їх з параметрами коливань зварювальної ванни та відповідної можливості більш ефективного керування процесом наплавлення шляхом створення аналітичних моделей.

У даній роботі зв'язок V_n з характеристиками коливань – частотою ν та амплітудою A – встановлюється через критерій суцільності валику: формування суцільного валику можливе при рівномірному перекритті по ширині [77]. Відповідно до цього критерію була сформована наступна задача: нехай зварювальна ванна коливається поперек осі наплавлення x за гармонічним законом, де $L = 2 \cdot A$ – розмах коливання (рис. 3.1), та рухається з постійною лінійною швидкістю V_n уздовж осі x . Тоді необхідно визначити швидкість наплавлення V_n при умові суцільності – нормаль BA , яка поєднує точку A – середину відрізка між двома сусідніми «вершинами» синусоїди з довільною точкою траєкторії B , повинна мати довжину, рівну половині ширини валику $-\frac{l}{2}$, який отриманий без впливу коливань.

Відповідно до рисунку, приймаючи BA як відрізок нормалі з координатами $((y_1, x_1); (\frac{L}{2}, x_2))$, можна записати для точок A і B наступні вирази:

$$\frac{L}{2} = a_n \cdot x_2 + b_A \text{ – для точки } A;$$

$$y_1 = a_n \cdot x_1 + b_B \text{ – для точки } B,$$

де a_n – кутовий коефіцієнт нормалі, b_A, b_B – вільний член.

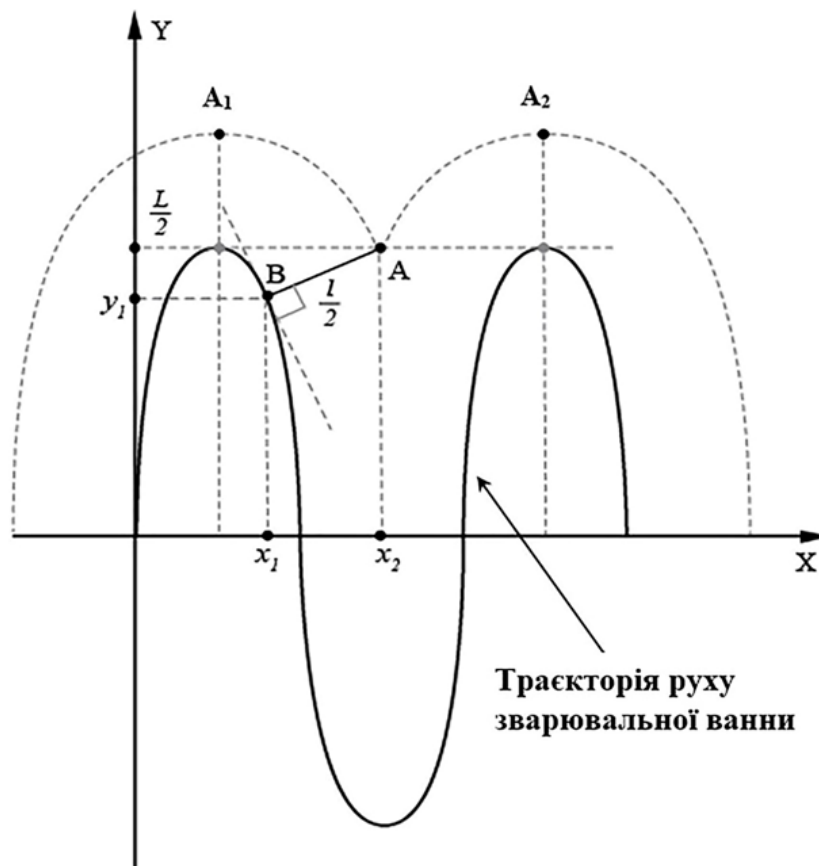


Рисунок 3.1 – Схема руху зварювальної ванни шириною l по синусоїдальній траєкторії гармонійних коливань уздовж осі наплавлення x

Тоді має силу вираз:

$$x_2 - x_1 = \frac{1}{a_n} \cdot \left(\frac{L}{2} - y_1 \right). \quad (3.1)$$

Так як $x_2 - x_1$ є відстанню, у подальших міркуваннях цей вираз буде представлений через модуль $|x_2 - x_1|$. З іншого боку, визначаючи AB , як відстань довжиною $\frac{l}{2}$ між точками з відомими координатами, можна записати вираз:

$$\left(\frac{l}{2} \right)^2 = (x_2 - x_1)^2 + \left(\frac{L}{2} - y_1 \right)^2. \quad (3.2)$$

Приймаючи координати x та y як функції часу t , тобто $x = x(t)$, $y = \frac{L}{2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot \nu \cdot t)$, значення a_n можна вирахувати за виразом для кутового коефіцієнту нормалі [78]:

$$a_n = -\frac{1}{\left(\frac{dy}{dx}\right)} = -\frac{1}{\left(\frac{\frac{\partial y}{\partial t} dt}{\frac{\partial x}{\partial t} dt}\right)} = -\frac{1}{\left(\frac{\frac{\partial y}{\partial t}}{\frac{\partial x}{\partial t}}\right)} = -\frac{1}{\frac{2 \cdot v \cdot \pi \cdot L \cdot \cos(2 \cdot v \cdot \pi \cdot t)}{2 \cdot V_n}} = -\frac{V_n}{v \cdot \pi \cdot L \cdot \cos(2 \cdot v \cdot \pi \cdot t)}. \quad (3.3)$$

Таким чином, приймаючи до уваги той факт, що значення y_1 є деяке випадкове значення функції $y = \frac{L}{2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot v \cdot t)$, то індекс 1 можна відкинути. Тоді, з урахуванням виразів (3.1) – (3.3), можна записати наступну систему рівнянь:

$$\begin{cases} a_n = -\frac{V_n}{\pi \cdot v \cdot L \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot v \cdot t)} \\ |x_2 - x_1| = \frac{1}{|a_n|} \cdot \left(\frac{L}{2} - \frac{L}{2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot v \cdot t)\right) \\ \left(\frac{l}{2}\right)^2 = (x_2 - x_1)^2 + \left(\frac{L}{2} - \frac{L}{2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot v \cdot t)\right)^2 \end{cases} \quad (3.4)$$

Рішення цієї системи відносно V_n буде наступним:

$$V_n = \pi \cdot v \cdot L \cdot \frac{(1 - \sin(2 \cdot \pi \cdot v \cdot t)) \cdot |\cos(2 \cdot \pi \cdot v \cdot t)|}{\sqrt{\left(\frac{l}{L}\right)^2 - (1 - \sin(2 \cdot \pi \cdot v \cdot t))^2}}. \quad (3.5)$$

З отриманого виразу видно, що він непридатний для практичного застосування, так як швидкість наплавлення V_n є стала величина, тобто вона не повинна залежати від часу t або час повинен бути функцією від $V_n - t = f(V_n)$. Однак це призведе до складного виразу, який по суті буде трансцендентним рівнянням відносно V_n .

З іншого боку, вираз (3.5) отриманий для певної точки простору (точки A), тобто при певному фіксованому проміжку часу – t_A , коли точка A з'явилась у просторі. Тоді тригонометричні функції у формулі (3.5) є не функціями часу, а деякими невідомими константами, які можна визначити із наступних міркувань.

Вираз (3.5) можна визначити наступним чином:

$$V_n = k_{V_n} \cdot v \cdot L, \quad (3.5')$$

де $k_{V_n} = f\left(\frac{l}{L}, t_A\right)$ – коефіцієнт, який дорівнює:

$$k_{V_H} = \frac{(1 - \sin(2 \cdot \pi \cdot v \cdot t_A)) \cdot |\cos(2 \cdot \pi \cdot v \cdot t_A)|}{\sqrt{\left(\frac{l}{L}\right)^2 - (1 - \sin(2 \cdot \pi \cdot v \cdot t_A))^2}}. \quad (3.6)$$

Нехай у момент часу t_A зварювальна ванна займе положення у точці B криволінійної траєкторії руху під впливом коливань (рис. 3.2). Тоді у точці B можна провести дотичну BD завдяки якій утворюється прямокутний трикутник ABD з прямим кутом DBA . Цей трикутник є подібним до трикутника ABC . Тоді буде мати місце рівність $\frac{AC}{AB} = \frac{AB}{AD}$, тобто:

$$\frac{\frac{L}{2} - \frac{L}{2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot v \cdot t_A)}{\frac{l}{2}} = \frac{l}{AD}. \quad (3.7)$$

Представимо AD як $AD = n \cdot L$, де n – деякий параметр.

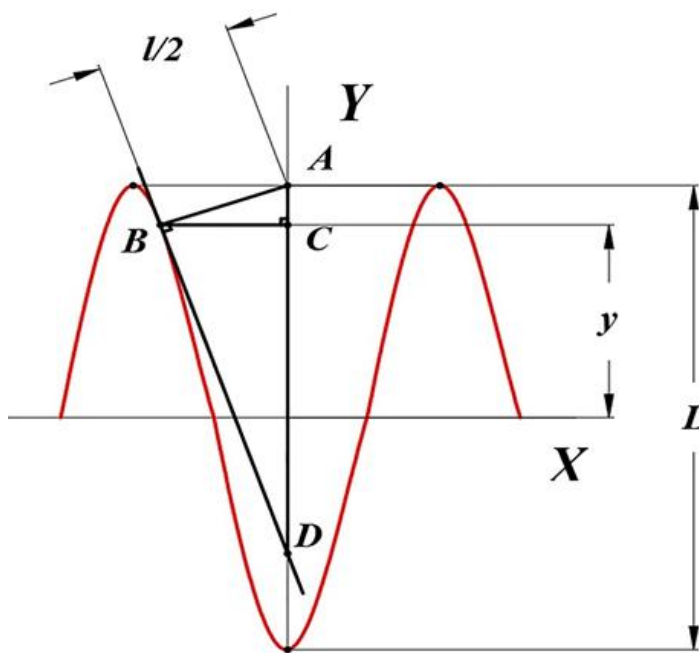


Рисунок 3.2 – Схема визначення тригонометричних функцій у момент часу t_A

Тоді, відповідно до виразу (3.7), значення тригонометричних функцій у момент часу t_A будуть дорівнювати виразам:

$$\left[\begin{array}{l} 1 - \sin(2 \cdot \pi \cdot \nu \cdot t_A) = \frac{1}{2 \cdot n} \cdot \left(\frac{l}{L}\right)^2 \\ \sin(2 \cdot \pi \cdot \nu \cdot t_A) = 1 - \frac{1}{2 \cdot n} \cdot \left(\frac{l}{L}\right)^2 \\ \cos(2 \cdot \pi \cdot \nu \cdot t_A) = \sqrt{1 - \left(1 - \frac{1}{2 \cdot n} \cdot \left(\frac{l}{L}\right)^2\right)^2} \end{array} \right. \quad (3.8)$$

З рисунка 3.2 видно, що валик, який наплавляється, буде більш щільніший, якщо точка B буде прямувати до вершини синусоїди, тобто кут ABC буде прямувати до 0 . А це означає, що положення точки D буде знижуватись вздовж осі Y , збільшуючи довжину відрізка AD .

При підстановці отриманих значень тригонометричних функцій (3.8) у вираз (3.6), отримаємо повну формулу щодо визначення швидкості наплавлення в залежності від параметрів коливань та співвідношення l/L , де саме l виражає комплекс впливу енергетичних параметрів режиму та теплоенергетичних властивостей сталей на суцільність валика, що наплавляється:

$$V_n = \pi \cdot \nu \cdot L \cdot \frac{\left(\frac{1}{2 \cdot n} \cdot \left(\frac{l}{L}\right)^2\right) \cdot \sqrt{1 - \left(1 - \frac{1}{2 \cdot n} \cdot \left(\frac{l}{L}\right)^2\right)^2}}{\sqrt{\left(\frac{l}{L}\right)^2 - \left(\frac{1}{2 \cdot n} \cdot \left(\frac{l}{L}\right)^2\right)^2}} \quad (3.9)$$

Параметр n є коефіцієнт, завдяки якому можна змінювати період коливань зварювальної ванни відносно осі наплавлення x та, тим самим, обирати ступінь суцільності валика, що наплавляється, за рахунок швидкості. Його значення можна визначити з області допустимих значень наступної системи виразів:

$$\begin{cases} 1 > 1 - \frac{1}{2 \cdot n} \cdot \left(\frac{l}{L}\right)^2 > -1 \\ 1 > 1 - \left(1 - \frac{1}{2 \cdot n} \cdot \left(\frac{l}{L}\right)^2\right)^2 > 0. \\ \left(\frac{l}{L}\right)^2 - \left(\frac{1}{2 \cdot n} \cdot \left(\frac{l}{L}\right)^2\right)^2 > 0 \end{cases} \quad (3.10)$$

Рішенням даної системи нерівностей буде вираз: $n > 0,5 \cdot \frac{l}{L}$. Таким чином, кінцева формула щодо визначення швидкості наплавлення в умовах коливань зварювальної ванни буде відповідати наступній системі:

$$\begin{cases} V_n = \pi \cdot v \cdot L \cdot \frac{\left(\frac{1}{2 \cdot n} \cdot \left(\frac{l}{L}\right)^2\right) \cdot \sqrt{1 - \left(1 - \frac{1}{2 \cdot n} \cdot \left(\frac{l}{L}\right)^2\right)^2}}{\sqrt{\left(\frac{l}{L}\right)^2 - \left(\frac{1}{2 \cdot n} \cdot \left(\frac{l}{L}\right)^2\right)^2}} \\ n > 0,5 \cdot \frac{l}{L} \end{cases} \quad (3.11)$$

З аналізу даної системи за допомогою пакету *Mathcad* з урахуванням особливостей наплавлення у середовищі CO_2 на зразки товщиною від 10,0 мм до 12,0 мм були встановлені границі значення n від 4,5 до 6,5. Чим менше значення n , тим більше буде швидкість наплавлення та менше ступінь суцільності валику. При значеннях $n < 4,5$ доцільно використовувати дану формулу при зварюванні або наплавленні тонколистових пластин. Значення $n > 6,5$ не рекомендовані до використання, так як метал зварювальної ванни буде переплавлятися, що буде обумовлювати формування небажаних структурних складових.

Зі схеми (рис. 3.2) видно, що при фактичній швидкості наплавлення, яка буде більшою за розраховану за формулою (3.9), точка *A* буде знаходитись нижче за рівень амплітуди синусоїди, що буде обумовлювати формування валику меншої ширини; у випадку, коли фактична швидкість буде менша за розрахункову – то вище за рівень амплітуди синусоїди, що ймовірно буде причиною переплаву та

розтікання наплавленого металу, але в обох випадках суцільність валику не буде порушена.

Для визначення границь швидкості наплавлення була вирішена наступна задача: при певних граничних значеннях сили струму $I_n = 100,0$ А ($U_n = 23,5$ В), $200,0$ А ($U_n = 28,0$ В), витрати захисного газу за діапазоном від $15,0$ л/хв до $25,0$ л/хв, амплітуди $A = 0,003$ м, $0,007$ м, частоти $\nu = 3,0$ Гц, $4,5$ Гц та початковій швидкості наплавлення $V_{нпоч} = 0,005$ м/с знайти значення швидкості наплавлення за системою (3.11) при певному середньому значенні $n = 5,0$. Значення l визначалось, припускаючи, що розплав ванни у період теплонасичення має форму сфери об'єму V . Тоді l можна приблизно визначити, прийнявши $h = l$, де h є відстань від центру мас розплаву до проміжфазної границі:

$$h = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot V}{4 \cdot \pi}} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot m_{зв}}{4 \cdot \pi \cdot \rho_{рм}}}. \quad (3.12)$$

Масу металу зварювальної ванни $m_{зв}$ без врахування втрат на розбрикування та випаровування, можна визначити за виразом, кг [79], [80]:

$$m_{зв} = \frac{\eta \cdot I_n^2 \cdot U_d}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot (T_{пл} - T_n) \cdot V_{нпоч}} \cdot \left(\alpha_p + \frac{\rho_{рм} \cdot \eta \cdot U_d}{e \cdot c \cdot \phi \cdot T_{пл}} \right), \quad (3.13)$$

де перший доданок є частиною маси розплаву, що створюється завдяки плавленню електродного дроту; другий – частина маси розплаву, що з'являється завдяки плавленню основного металу. Результати розрахунків наведені у таблиці 3.1.

Розрахункові дані таблиці 3.1 були отримані при наступних параметрах, які визначають енергію зварювальної дуги та теплофізичні властивості зразків, що наплавляються: $\eta = 0,8$ – ефективний КПД нагрівання зварювальною дугою; $\lambda = 50,0$ Вт/(м·°К) – коефіцієнт теплопровідності; $T_{пл} = 1810,0$ °К (для Fe) – температура плавлення металу; $T_n = 293,0$ °К – початкова температура металу; $\alpha_p = 15,0$ - $25,0$ г/А·год. – коефіцієнт розплавлення; $c \cdot \phi = 4,8$ Дж/см³·К – об'ємна теплоємність; $\rho_{рм} = 7,02$ г/см³ – густина сталі у рідкому стані; e – основа натурального логарифму.

Таким чином визначено, що для подальших досліджень значення швидкості наплавлення V_n буде обиратися за діапазоном від 0,0025 м/с до 0,0077 м/с.

Таблиця 3.1 – Значення розрахункових значень швидкості наплавлення за системою (3.11)

Швидкість наплавлення початкова, $V_{нпоч}$, м/с	Сила струму наплавлення I_n , А	Амплітуда коливань A , м	Частота коливань ν , Гц	Ширина валику, що наплавлений без коливань l , м	Швидкість наплавлення за (3.11) V_n , м/с
0,005	100,0	0,003	3,0	0,006	0,0025
			4,5		0,0038
		0,007	3,0		0,0039
			4,5		0,0059
	200,0	0,003	3,0	0,011	0,0032
			4,5		0,0049
		0,007	3,0		0,0051
			4,5		0,0077

3.2 Вплив коливань на характер переносу електродного металу

Якість наплавленого металу в тому числі залежить від явищ, що визначають процес перенесення електродного металу у зварювальну ванну. На сьогоднішній день контроль такого перенесення зазвичай реалізується наступними основними способами:

- технологія *SST (Surface Tension Transfer)* реалізує фізичний механізм перенесення краплі рідкого металу у зварювальну ванну за рахунок сил поверхневого натягу, який обумовлений використанням джерел живлення, здатних генерувати відповідну форму зварювального струму у реальному часі завдяки роботі зворотного зв'язку [81];
- технологія *CMT (Cold Metal Transfer)* базується на застосуванні алгоритму керування руху електродного дроту, який дозволяє у момент короткого замкнення змінювати напрям руху дроту таким чином, щоб переривати внесок теплової енергії в основний метал – це дозволяє контролювано

переносити електродний метал саме по краплі без розбризкування, що обумовлює майже абсолютну стабільність дуги [82];

- застосування адаптивно-імпульсних режимів подавання електродного дроту у зварювальну ванну, застосування яких дозволяє контролювати всі процеси, що обумовлюють формування зварного з'єднання або наплавленого валика: горіння дуги, процеси плавлення і перенесення електродного металу у зварювальну ванну, кристалізацію розплаву.

Реалізація таких адаптивно-імпульсних режимів можлива через застосування у конструкції джерела живлення каналів зворотних зав'язків [83] та штучного інтелекту, що реалізується на базі побудови нейронної мережі [84] - [85], застосування контролерів нечіткої та жорсткої логіки [85], алгоритмів з застосуванням подвійного вейвлет-перетворення [86] та ін.

Таким чином, здійснення контролю над перенесенням електродного металу у зварювальну ванну реалізується впливом певного характеру на рух електродного дроту. Це обумовило потребу з'ясувати можливість впливу на перенесення електродного металу саме коливаннями поверхні деталі, яка наплавляється, за постійним значенням швидкості електродного дроту.

У відповідності з цим було проведено осцилографування процесів наплавлення з різними амплітудно-частотними параметрами за одним технологічним режимом наплавлення: $I_n = 125,0$ А, $U = 24,0$ В - $26,0$ В, $V_n = 14,0$ м/год.

Для запису осцилограм було проведено 5 експериментів на даному технологічному режимі із застосуванням коливальних параметрів за амплітудами 0,003 м та 0,007 м і за частотами 3,0 Гц і 4,5 Гц. Значення технологічних і коливальних параметрів були обрані з метою отримати режими із задовільним характером горіння дуги. Осцилографування здійснювалось спеціалізованим комплексом для моніторингу процесу зварювання, що описаний у розділі 2.

З отриманих осцилограм обирались ділянки, які відповідали найбільш стабільному горінню дуги. За отриманими ділянками осцилограм визначалось

середнє значення періоду горіння дуги t , що відповідає проміжку між максимумами.

1. На режимі наплавлення без коливань. Значення часу горіння дуги є наступними (рис. 3.3, а): 0,033 с, 0,04 с, 0,024 с, 0,032 с, 0,034 с, 0,035 с, 0,065 с, 0,06 с, 0,07 с, 0,035 с, 0,02 с, 0,035 с, 0,03 с. Середнє значення – 0.039 с.

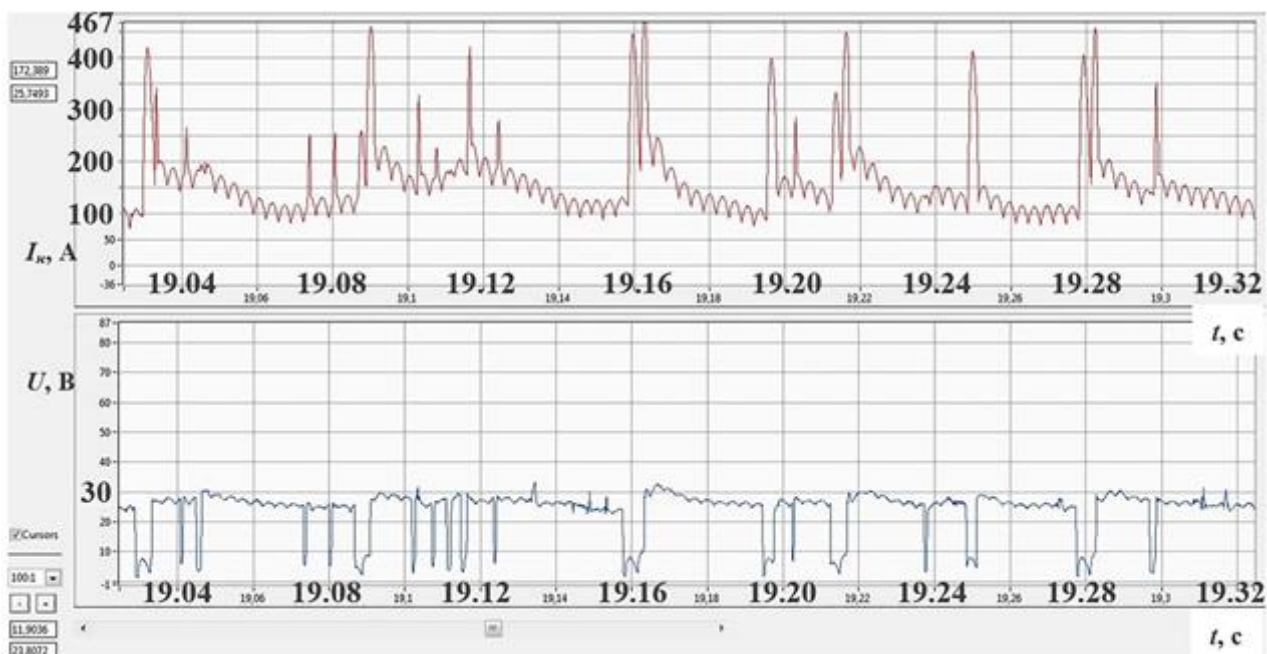
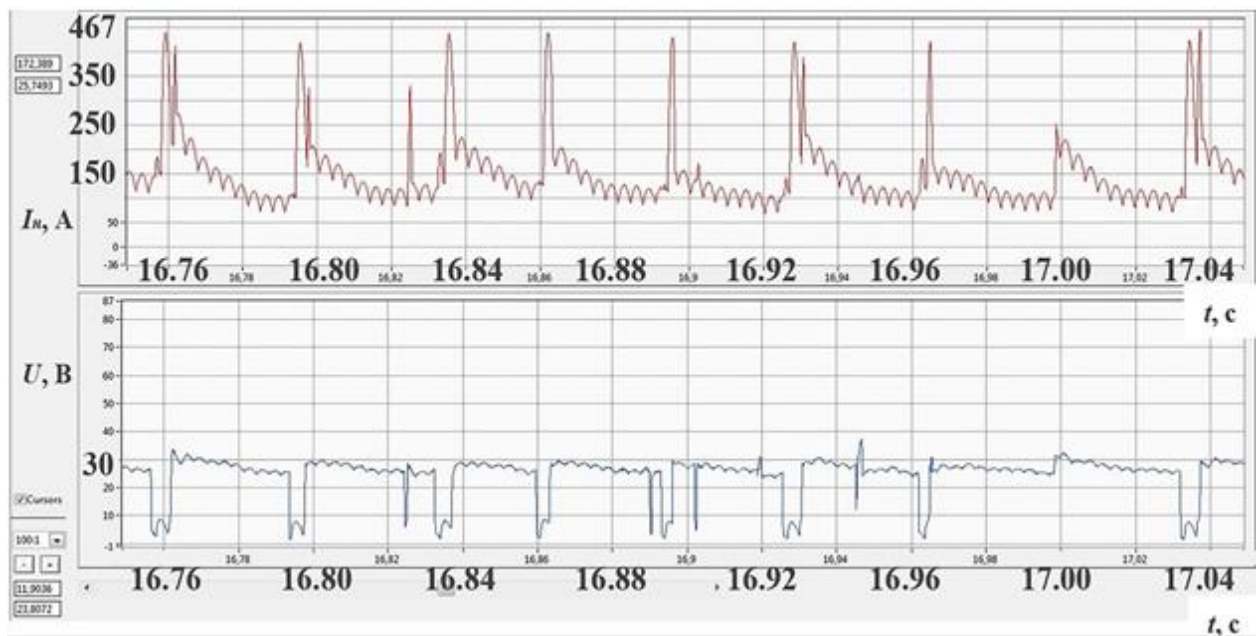


Рисунок 3.3, а. Осцилограми сили струму наплавлення та напруги на дугі -- без впливу коливань

2. На режимі наплавлення за частоти коливань у $\nu = 3,0$ Гц та за амплітуди у $A = 7,0$ мм. Значення часу горіння дуги є наступними (рис. 3.3,б): 0,049 с, 0,03 с, 0,045 с, 0,047 с, 0,056 с, 0,048 с, 0,037 с, 0,037 с, 0,031 с. Середнє значення – 0,042 с.

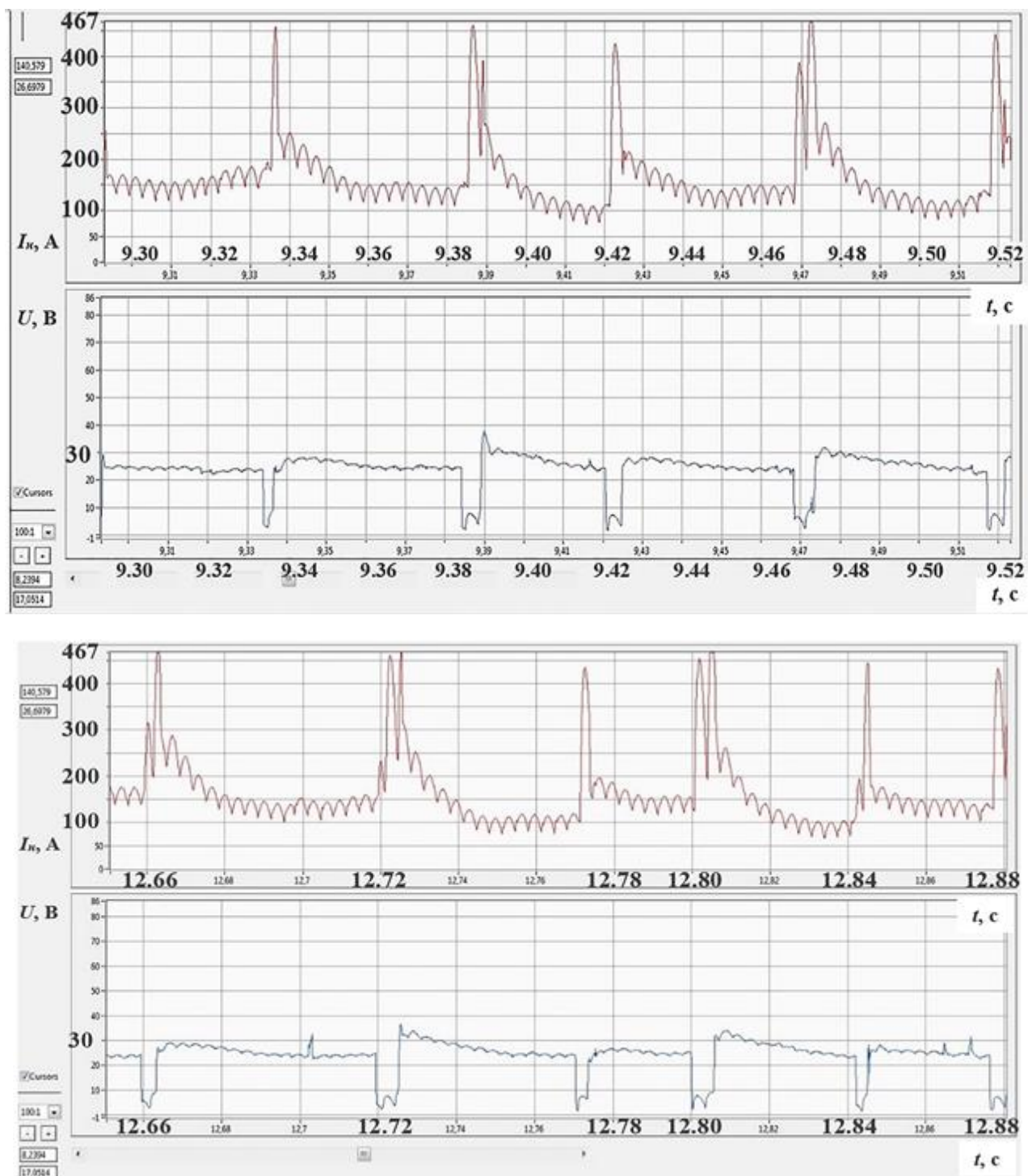


Рисунок 3.3, б. Осцилограми сили струму наплавлення та напруги на дузі -
- з коливаннями за частоти у $\nu = 3,0$ Гц та за амплітуди у $A = 7,0$ мм

3. На режимі наплавлення за частоти коливань у $\nu = 3,0$ Гц та за амплітуди $A = 3,0$ мм. Значення часу горіння дуги є наступними (рис. 3.3,в): 0,0583 с, 0,055 с, 0,056 с, 0,055 с, 0,05 с, 0,0142 с, 0,058 с, 0,05 с, 0,022 с, 0,048 с, 0,07 с, 0,0375 с, 0,0125 с, 0,031 с, 0,03 с, 0,025 с, 0,05 с, 0,025 с. Середнє значення – 0.042 с.

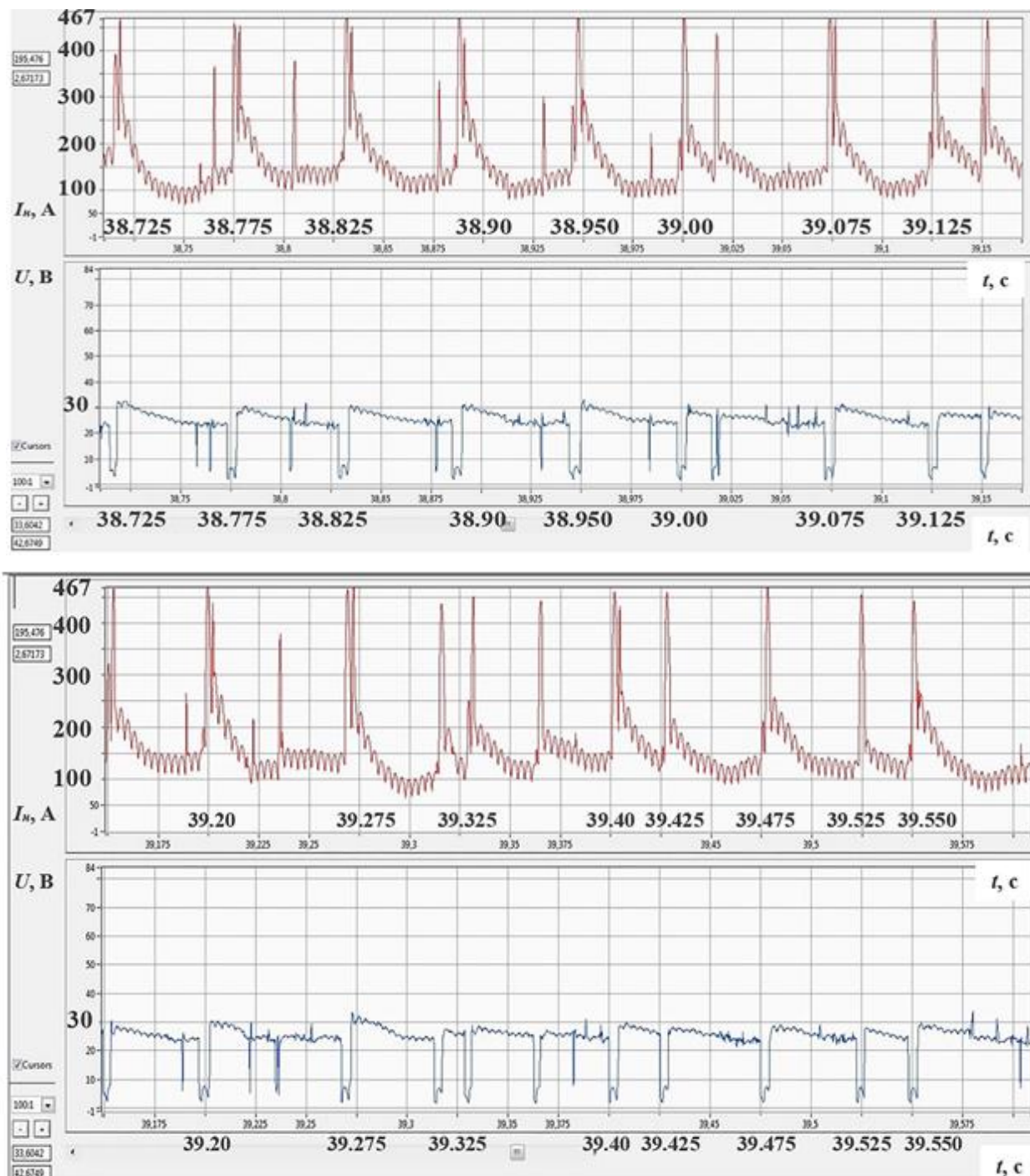


Рисунок 3.3, в. Осцилограми сили струму наплавлення та напруги на дузі -- з коливаннями за частоти у $\nu = 3,0$ Гц та за амплітуди у $A = 3,0$ мм

4. На режимі наплавлення за частоти коливань у $\nu = 4,5$ Гц та амплітуди у $A = 3,0$ мм. Значення часу горіння дуги є наступними (рис. 3.3,г): 0,068 с, 0,08 с, 0,06 с, 0,0725 с, 0,028 с, 0,06513 с, 0,0536 с. Середнє значення – 0,061 с.

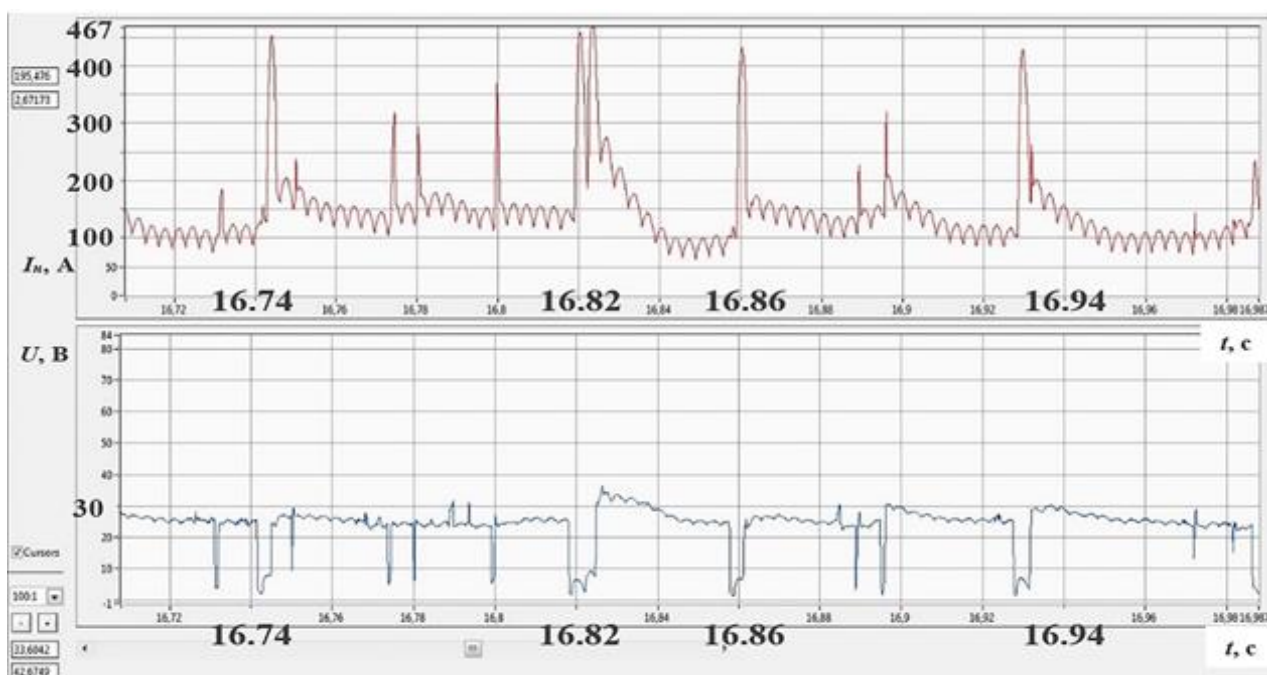
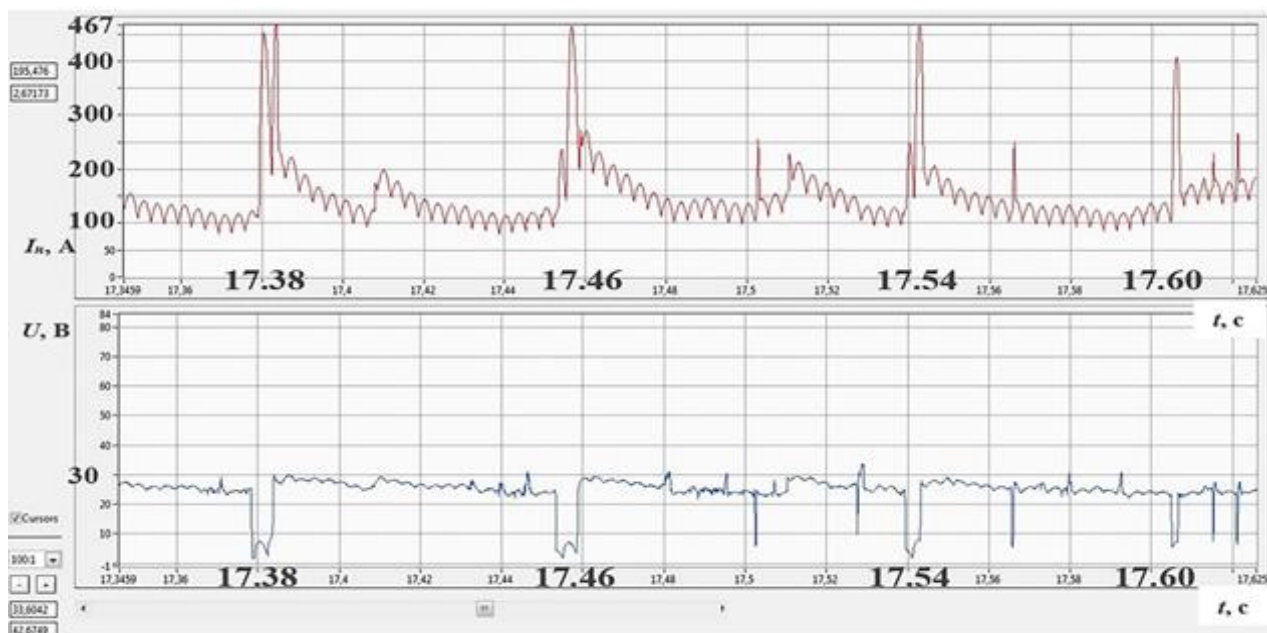


Рисунок 3.3, г. Осцилограми сили струму наплавлення та напруги на дузі -- з коливаннями за частоти у $\nu = 4,5$ Гц та за амплітуди у $A = 3,0$ мм

5. На режимі наплавлення за частоти коливань у $\nu = 4,5$ Гц та за амплітуди у $A = 7,0$ мм. Значення часу горіння дуги є наступними (рис. 3.3,д): 0,1 с, 0,035 с,

0,105 с, 0,01125 с, 0,094 с, 0,025 с, 0,083 с, 0,14 с, 0,078 с, 0,1 с, 0,025 с, 0,025 с.
Середнє значення – 0,068 с.

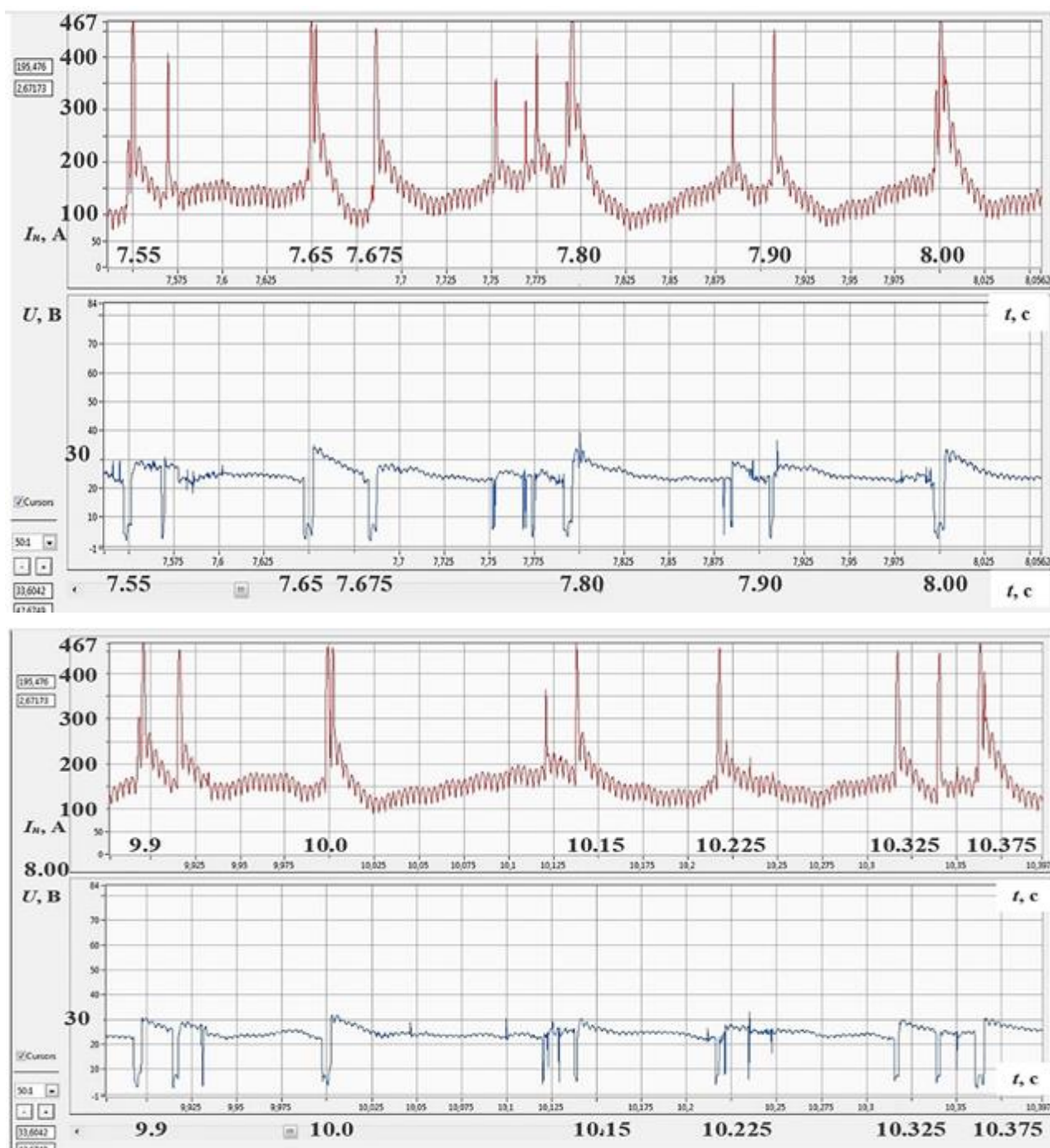


Рисунок 3.3, д. Осцилограми сили струму наплавлення та напруги на дузі -- з коливаннями за частоти у $\nu = 4,5$ Гц та за амплітуди у $A = 7,0$ мм

З аналізу осцилограм видно, що частота впливає на перенос рідкого металу у зварювальну ванну по різному: значення періоду горіння дуги збільшується всього

до 0,042 с на частоті коливань $\nu = 3,0$ Гц та до значень 0,061 с і 0,068 с на частоті коливань $\nu = 4,5$ Гц у порівнянні з наплавленням без впливу коливань (рис. 3.3, а).

Час існування рідкої перемички при короткому замкненні у 1,8 рази менше при використанні зовнішніх коливань у порівнянні з наплавленням без них.

Для прогнозування величини t , як параметру теплового впливу на основний метал, обумовлено побудову певної залежності від параметрів коливального режиму.

Процес переносу металу у зварювальну ванну при наплавленні плавким електродом на постійному струмі у середовищі вуглекислого газу можна описати сукупністю рівнянь [87]:

$$\begin{cases} \frac{\partial l_{\partial}}{\partial t} = V_e - V_n \\ V_e = V_{ey} + (V_{maz} - V_{ey}) \cdot e^{-\frac{t}{T_{3л}}} \end{cases}, \quad (3.14)$$

де l_{∂} – довжина дугового проміжку, м; t – час, с; V_e – швидкість плавлення електроду, м/хв.; V_n – швидкість подавання електроду у зварювальну ванну, м/хв.; V_{ey} – швидкість плавлення електроду, що встановилася після досягнення сили струму 125,0 А, м/хв.; $V_{max} = (5,0 - 6,0) \cdot V_n$ – швидкість плавлення електроду, що відповідає піковому значенню сили струму I_{max}^H , м/хв.; e – основа натурального логарифму; $T_{3л}$ – постійна часу зварювального ланцюга, с. Швидкість подавання електроду V_e визначалась за формулою (2.5) розділу 2.

Використовуючи рівняння сукупності (3.14), можна визначити довжину дугового проміжку, приймаючи момент короткого замкнення за початковий, тоді початковими умовами будуть значення $l_{\partial 0}^{k3} = 0; t_0^{k3} = 0$, звідки:

$$l_{\partial} = T_{3л} \cdot (V_{max} - V_{ey}) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{3л}}} \right) - t \cdot (V_n - V_{ey}). \quad (3.15)$$

Швидкість зміни дугового проміжку $\frac{\partial l_{\partial}}{\partial t}$ визначається за (3.14) і дорівнює:

$$\frac{\partial l_{\partial}}{\partial t} = (V_{maz} - V_{ey}) \cdot e^{-\frac{t}{T_{3л}}} - (V_n - V_{ey}). \quad (3.16)$$

У момент короткого замкнення $\frac{\partial l_{\partial}}{\partial t} = 0$, тоді час горіння дуги t_{∂} буде дорівнювати виразу:

$$t_{\partial} = T_{3л} \cdot \ln \frac{V_{maz} - V_{ey}}{V_n - V_{ey}}. \quad (3.17)$$

Даний вираз дає змогу визначити V_{ey} :

$$V_{ey} = \frac{V_n \cdot e^{\frac{t_{\partial}}{T_{3л}}} - V_{maz}}{\left(e^{\frac{t_{\partial}}{T_{3л}}} - 1 \right)}. \quad (3.18)$$

Для $\alpha_p = 11,33$ г/(А·год.): $V_n = 2,677$ м/хв., $V_{maz} = 5,5 \cdot V_n = 14,721$ м/хв. Для зварювального дроту $d_e = 1,6$ мм та $2,0$ мм $T_{3л} = 0,01$ с [87], [88], для $d_e = 1,0$ мм $T_{3л} = 0,005$ с [88]. Тоді для $d_e = 1,2$ мм $T_{3л} = 0,007$ с. За допомогою осцилограми, що отримана при наплавленні без застосування коливань зварювальної ванни, можна визначити час горіння дуги – t_{∂} : $t_{\partial} = 0,039$ с. Тоді V_{ey} буде дорівнювати за виразом (3.18): $V_{ey} = 2,631$ м/хв. Як видно, у даному випадку майже виконується рівність $V_{ey} = V_n$, що дає можливість виконувати наплавлення без коротких замикань [87] при застосуванні дуги великої довжини. З іншого боку, при наплавленні у CO_2 значення довжини дугового проміжку визначається діаметром краплі розплавленого металу [89].

В умовах коливань зварювальної ванни довжина дуги EF буде визначатися за виразом: $EG^2 + FG^2 = EF^2$ (рис. 3.4), де $FG = \frac{L}{2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot \nu \cdot t)$ – закон коливань зварювальної ванни, $L = 2 \cdot A$ – розмах коливань, $EG = l_{\partial 0}$ – значення міждугового проміжку у момент $t_0 = 0 + \frac{k}{\nu}$, положення зварювального інструменту над віссю наплавлення з нульовим відхиленням від неї.

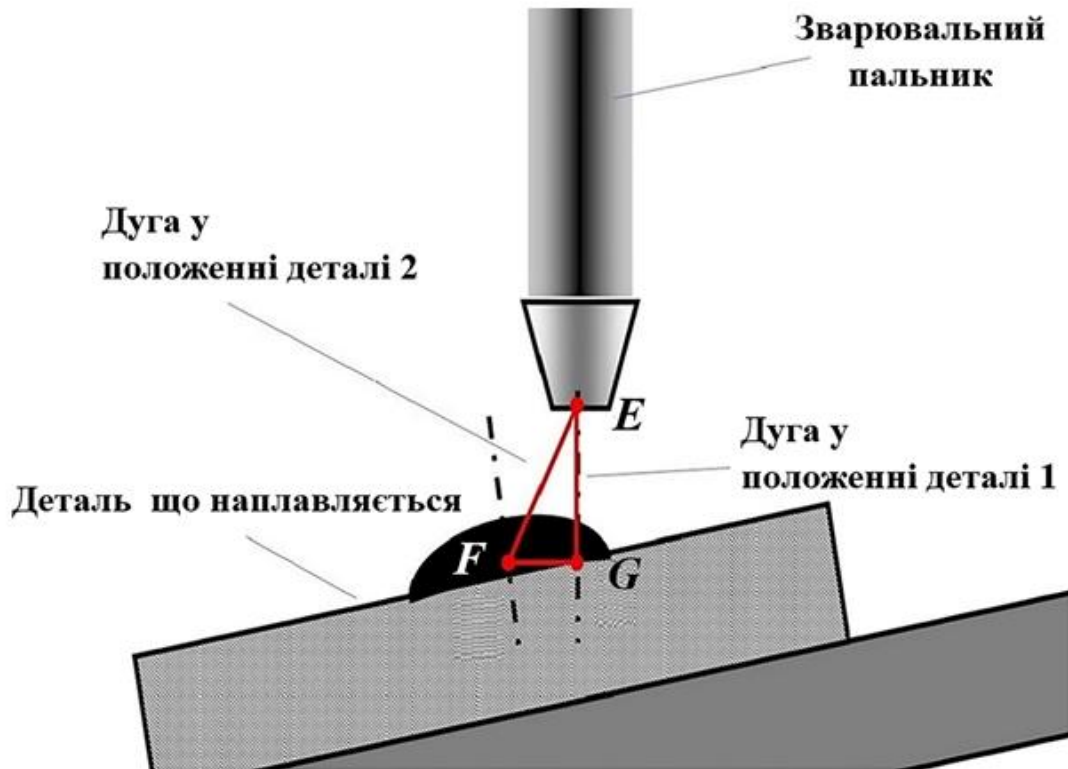


Рисунок 3.4 – Схема коливань довжини дуги при коливаннях деталі:
1 – положення при $L = 0$; 2 – положення при $L \neq 0$

Тоді для довжини дуги l_d буде мати місце рівність:

$$l_d = \sqrt{l_{d0}^2 + \left(\frac{L}{2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot \nu \cdot t)\right)^2}. \quad (3.19)$$

А швидкість зміни довжини дугового проміжку буде визначатися за виразом:

$$V_l = \frac{\partial l_d}{\partial t} = V_0 + a \cdot t = V_0 + \frac{\partial^2 l_d}{\partial t^2} \cdot t = V_0 + t \cdot \frac{(L \cdot \pi \cdot \nu)^2 \cdot \cos(4 \cdot \pi \cdot \nu \cdot t)}{\sqrt{l_{d0}^2 + \left(\frac{L}{2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot \nu \cdot t)\right)^2}} +$$

$$-t \cdot \frac{\frac{L^4 \cdot (\pi \cdot \nu)^2}{16} \cdot \sin^2(4 \cdot \pi \cdot \nu \cdot t)}{\sqrt{\left(l_{d0}^2 + \left(\frac{L}{2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot \nu \cdot t)\right)^2\right)^3}}, \quad (3.20)$$

де V_0 – значення швидкості зміни довжини дугового проміжку у момент t_0 . При підстановці у вираз (3.16) виразу (3.20), буде отримано рівняння при умові $V_0 = 0$:

$$f(t) = (V_{\text{зв}} - V_n) + (V_{\text{max}} - V_{\text{зв}}) \cdot e^{-\frac{t}{T_{3л}}} - t \cdot \frac{(L \cdot \pi \cdot \nu)^2 \cdot \cos(4 \cdot \pi \cdot \nu \cdot t)}{\sqrt{l_{\text{до}}^2 + \left(\frac{L}{2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot \nu \cdot t)\right)^2}} +$$

$$+ t \cdot \frac{\frac{L^4 \cdot (\pi \cdot \nu)^2}{16} \cdot \sin^2(4 \cdot \pi \cdot \nu \cdot t)}{\sqrt{\left(l_{\text{до}}^2 + \left(\frac{L}{2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot \nu \cdot t)\right)^2\right)^3}} = 0. \quad (3.21)$$

Дане рівняння є трансцендентним відносно змінної t . Його рішення здійснювалось чисельним методом за допомогою пакету *Mathcad*. Значення $l_{\text{до}}$ обралося як технологічний параметр з виразу: $l_{\text{до}} = 0,5 \cdot (d_e + 3,0) = 2,2$ мм, але при такому значенні зварювальна дуга в умовах коливань горіла нестабільно та гасла, через що була збільшена до 4,0 мм. Для значення $l_{\text{до}} = 4,0$ мм графічні результати наведені на рисунку 3.5, а розрахункові – у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Значення розрахункових та експериментальних значень періоду горіння дуги t

Номер експерименту	Амплітуда A , м	Частота ν , Гц	Розрахункове значення періоду $t_{\text{до}}$ за (3.22), с	Вимірюване середнє значення періоду $t_{\text{до}}$ за рис 3.3, с	Похибка, %
1	-	-	-	0,039	-
2	0,007	3,0	0,018 0,0343	0,042	18,3
3	0,003	3,0	0,0387	0,042	7,8
4	0,003	4,5	0,0207 0,0852	0,061	39,6
5	0,007	4,5	0,00871 0,0203 0,08937	0,068	31,4

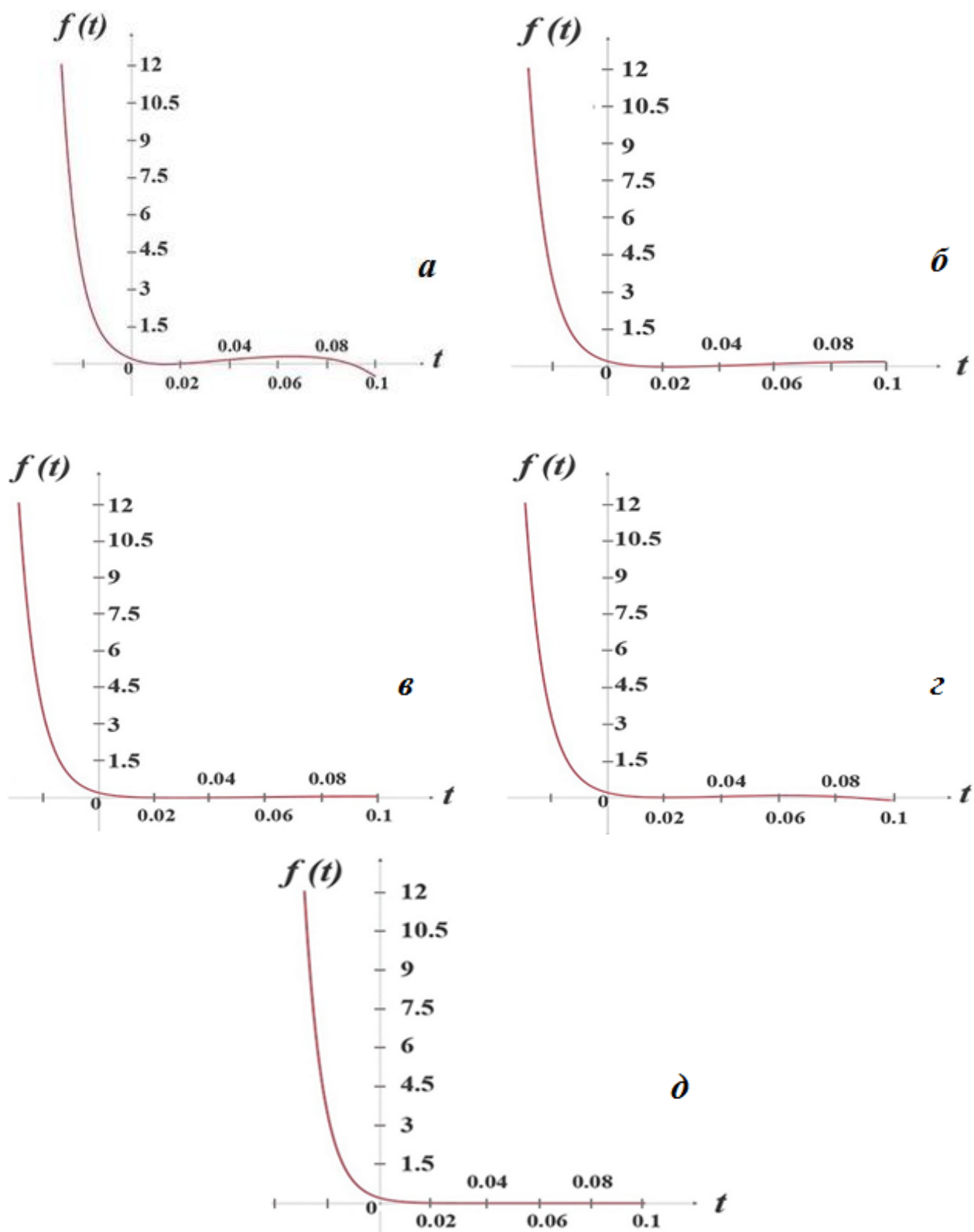


Рисунок 3.5 – Графіки рішення рівняння (3.22) при різних коливальних режимах: а – $\nu = 4,5$ Гц, $A = 0,007$ м; б – $\nu = 3,0$ Гц, $A = 0,007$ м; в – $\nu = 3,0$ Гц, $A = 0,003$ м; г – $\nu = 4,5$ Гц, $A = 0,003$ м; д – $\nu = 0$ Гц, $A = 0$ м

З аналізу даних таблиці 3.2 можна бачити суттєву погрішність у вимірних та розрахункових значеннях величини t на режимах з частотою 4,5 Гц, що ймовірно є результатом: погрішності виміру струму дуги, порушення стабільності горіння дуги в наслідок її періодичних відхилень, які обумовлені зовнішніми коливаннями під час наплавлення, недостатністю кількості вимірів за осцилограмами.

3.3 Вплив погрішності виміру струму наплавлення

Так як величина струму наплавлення 125,0 А встановлювалася за допомогою амперметра на лицевій панелі джерела живлення ВДУ – 506, то величина похибки виміру, що обумовлена конструкцією амперметра, потребує оцінки. Вимірювання дійсного значення струму наплавлення здійснювалось за допомогою спеціалізованого комплексу для моніторингу процесу зварювання [75]. Даний комплекс дозволяє визначати середнє значення струму наплавлення за заданий час, а також визначати більш точну оцінку за методикою *True RMS*. Для часу наплавлення, що відповідає осцилограмам (рис 3.3), було здійснено визначення середнього і за способом *TrueRMS* значень струму наплавлення, що наведено у таблиці 3.3

Таблиця 3.3 – Значення середнього струму на дузі і за методикою виміру *TrueRMS* та відповідні погрішності відносно значення струму 125,0 А

Номер експерименту	Амплітуда, А, м	Частота ν , Гц	Середнє значення струму, А	Значення струму за <i>TrueRMS</i> , А	Похибка за середнім значенням струму, %	Похибка за <i>True RMS</i> , %
1	-	-	163,65	176,98	31,0	41,6
2	0,007	3,0	157,64	174,18	26,0	39,0
3	0,003	3,0	164,71	179,99	31,7	44,0
4	0,003	4,5	163,01	179,33	30,4	43,5
5	0,007	4,5	163,23	171,36	30,6	37,1

З таблиці 3.3 видно, що похибка за значенням струму знаходиться в межах від 26,0 % до 44,0 %. Співставлення розрахункових даних з визначення параметра t за

(3.21) для вимірних значень сили струму наплавлення за *TrueRMS* (табл. 3.3) і її заданого значення 125,0 А (табл. 3.2) виявило, що похибка у визначенні параметру t не перевищує 4 знаку після коми; тобто розбіжність у значеннях сили струму наплавлення не впливає на визначення t .

3.4 Вплив коливань на стабільність горіння та тепловміст дуги, ступінь розбризування електродного металу

Визначення стабільності горіння дуги визначалось за методикою за основі статистичного аналізу осцилограм, що розроблена за керівництвом академіка НАН України І.К. Походні та д.т.н. Ю.М, Ланкіна для дуг на зворотній полярності [90], [91]. Відповідно до цієї методики, критеріями стабільності для дуг, що горять в середовищі CO_2 є прямування до мінімального значення коефіцієнтів варіації, віднесених до частоти коротких замкнень $f_{кз}$ по напрузі і струму дуги відповідно:

$C_V^{U_\delta}$ та $C_V^{I_n}$. Вони визначаються за наступними виразами:

$$C_V^U = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{np} (U_{\delta i} - M_U)^2}{(n-1)}}}{M_U \cdot f_{кз}} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^p (U_{\delta i} - M_U)^2}{(n-1)}}}{M_U} \cdot t_\delta, \quad (3.22')$$

$$C_V^{I_n} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^p (I_{nj} - M_{I_n})^2}{(n-1)}}}{M_{I_n} \cdot f_{кз}} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^p (I_{nj} - M_{I_n})^2}{(n-1)}}}{M_{I_n}} \cdot t_\delta. \quad (3.22'')$$

де p – кількість вимірів напруги $U_{\delta i}$ або струму наплавлення I_{nj} відповідно у вибірці, t_δ – вимірюване середнє значення періоду за рисунками 3.3, а-д, M_{I_n} , M_U – середнє значення сукупності вимірів струму наплавлення та напруги на дузі відповідно. Визначення коефіцієнтів здійснювалось за допомогою програмного забезпечення спеціалізованого комплексу [75] для моніторингу

процесу зварювання *LabVIEW*. Відповідні значення $C_V^{U_d}$ та $C_V^{I_H}$ наведено у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Значення коефіцієнтів варіації $C_V^{U_d}$ та $C_V^{I_H}$

Номер експерименту	Амплітуда A , м	Частота ν , Гц	Вимірюване середнє значення періоду t_d за рис. 3.3, с	$C_V^{U_d}$	$C_V^{I_H}$
1	-	-	0,039	0,009555	0,01599
2	0,007	3,0	0,042	0,01218	0,01974
3	0,003	3,0	0,042	0,01134	0,01848
4	0,003	4,5	0,061	0,016714	0,02806
5	0,007	4,5	0,068	0,01156	0,02176

Згідно з таблицею 3.4 та у відповідності з вищезначеними критеріями, найбільш стабільні режими наплавлення з коливаннями є за частоти у 3,0 Гц, причому фактор амплітуди мало впливає на стабільність, але збільшення амплітуди все ж таки знижує стабільність. За частоти у 4,5 Гц основним фактором, який знижує стабільність горіння, є саме частота, причому зростання амплітуди дещо стабілізує дугу. Отже, для стабільного горіння дуги необхідно використовувати технологічні режими наплавлення з якомога меншими значеннями як частоти, так і амплітуди коливань деталі. Значення амплітуди незначним чином впливає на величину періоду за частоти у 3,0 Гц, але за частоти коливань у 4,5 Гц збільшення амплітуди суттєво збільшує і величину періоду переносу краплі. Таким чином, можливість впливу на перенесення електродного металу керованими коливаннями на деталь, що наплавляється, має 2 складових: збільшення частоти коливань; збільшення амплітуди коливань.

У відповідності до наведеного, як показник порушення стабільності горіння дуги в умовах коливань є доцільним оцінити ступінь розбризкування електродного металу, яка за звичайних умов для зварювання (наплавлення) в середовищі CO_2 не

перевищує 5,0 % - 10,0 % [44], за іншими даними – 12,0 % [92]. Ступінь розбризкування Ψ визначалось за методикою, що викладена у розділі 2, пункт 2.7. Відповідні розрахунки наведені у таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Доля розбризкування наплавленого металу Ψ

Номер експерименту	Амплітуда A , м	Частота ν , Гц	$P_{\text{пластини}}$, г	$P_{\text{наплавлення}}$, г	$P_{\text{реит}}$, г	$P_{\text{дроту}}$, г	Ψ , %
1	-	-	280,7	317,53	315,3	32,8	6,7
2	0,007	3,0	308,4	340,3	336,8	35,2	9,94
3	0,003	3,0	311,8	352,6	347,6	41,1	12,1
4	0,003	4,5	267,2	406,5	398,4	39,6	20,4
5	0,007	4,5	314,1	350,1	343,7	34,4	18,6

З таблиці 3.5 видно, що найбільша ступінь розбризкування фіксується за частоти коливань у 4,5 Гц, при цьому збільшення амплітуди сприяє деякому зниженню розбризкування.

Причиною збільшення ступеню розбризкування А.Г. Потапьевский і В.Я. Лаврищев (рос.) вважають збільшення довжини дуги [93], що обумовлює перегрів краплі розплавленого металу. Зростання величини ентальпії рідкого металу перегрітої краплі обумовлює зростання її об'єму [94], що призводить до відповідного зниження частоти коротких замкнень (збільшення періоду горіння дуги t_d) [95]. У випадку коливань поверхні деталі, що наплавляється, певний внесок у збільшення ступеню розбризкування вносять коливання самої дуги відносно вертикального положення (рис. 3.4). Саме ці фактори найбільш суттєво обумовлюють нестабільний стан формування краплі електродного металу та відрив її у певний період часу $t_{\text{др}}$, який є меншим за t_d ($t_d > t_{\text{др}}$).

Для кількісної оцінки тепловмісту дуги, що горить в умовах коливань, було задіяно підхід к.т.н. О.В. Яровицина [96], що заснований на визначенні кількості електричної енергії, витраченої на горіння такої дуги тривалістю t_H :

$$Q_{\Sigma} = \int_0^{t_H} i(t) \cdot U(t) dt, \quad (3.23)$$

де $i(t)$ і $U(t)$ є середні значення струму і напруги на дузі за певний проміжок часу наплавлення t_n . Обробка осцилограм за даною методикою здійснювалась у програмному пакеті *PowerGraph 3.3*. Відповідні значення наведені у таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Середні значення струму і напруги на дузі за час t_n та кількості електричної енергії Q_Σ в дуговому проміжку за час t_n

Номер експерименту	Амплітуда A , м	Частота ν , Гц	Середнє значення струму $i(t)$, А	Середнє значення напруги $U(t)$, В	Q_Σ , кДж	Вимірюване середнє значення періоду t за рис. 3.3, с	Час наплавлення t_n , с
1	-	-	159,06	23,53	20,956	0,039	6,0
2	0,007	3,0	165,83	22,34	22,128	0,042	
3	0,003	3,0	166,55	22,17	21,802	0,042	
4	0,003	4,5	164,47	24,15	21,606	0,061	
5	0,007	4,5	163,31	23,27	22,355	0,068	

За осцилограмами було обрано часовий проміжок $t_n = 6,0$ с на тих ділянках осцилограм, де режим наплавлення був більш стабільний. За даними таблиці видно, що електрична енергія, що виділена у дуговому проміжку за час горіння дуги при наплавленні з коливаннями зростає на 4,0 % - 6,7 %, тобто суттєво не змінюється, що свідчить про відсутність значного зростання об'єму краплі, а, відповідно, пріоритетність у збільшенні долі розбризкування є саме від фактору коливань дуги відносно вертикального положення.

3.5 Визначення ступеню впливу коливань на силу струму наплавлення

Як видно з осцилограм (рис. 3.3), характер зміни струму наплавлення за період горіння дуги між короткими замкненнями має певний часовий проміжок, де його значення зменшується від максимального значення I_{max}^H до номінального значення I_n , що відповідає відрізку AB , на якому здійснюється інтенсивне зростання краплі електродного металу, а потім від I_n до мінімального значення I_{min}^H , на якому йде

зменшення товщини рідкої “шийки” між вже сформованою краплею та твердою фазою електродного металу до моменту короткого замкнення (рис. 3.6).

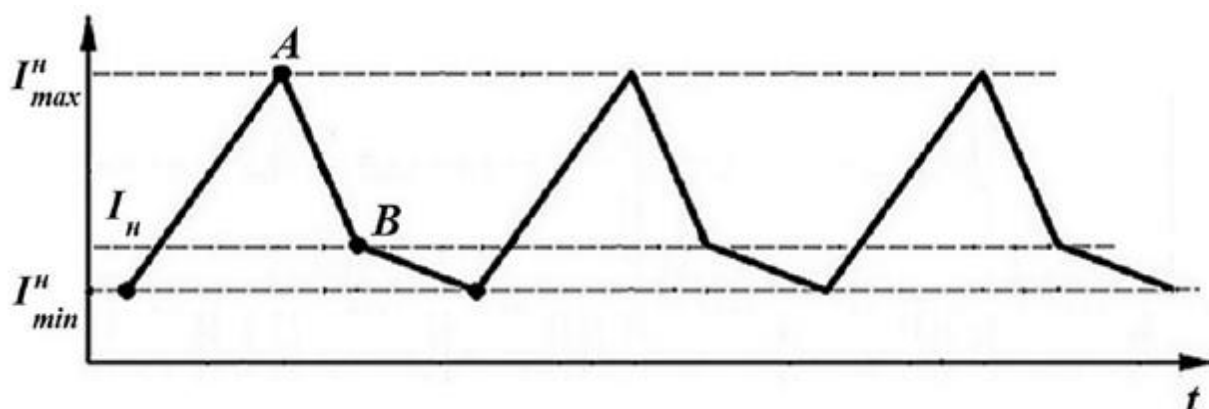


Рисунок 3.6 – Схема зміни струму наплавлення: $I_n^H_{max}$ – максимальне значення, I_n^H – номінальне значення, $I_n^H_{min}$ – мінімальне значення

Таким чином, впливаючи на кут нахилу відрізка AB можна контролювати розмір краплі електродного металу, а зменшуючи величину $I_n^H_{max}$ можна впливати на характер перенесення рідкого металу краплі у зварювальну ванну [97], що дозволить знизити ступінь розбризкування. Дані міркування обумовлюють проведення дослідження щодо визначення ступеню впливу параметрів коливань зварювальної ванни на величину зміни струму наплавлення на відріжку AB та характер цього зменшення. Відповідно до цього, теоретично вирішувалось рівняння Гауса у циліндричній системі координат для дуги, що має форму циліндра з радіусом r відносно першої похідної сили струму по довжині дуги $l_\partial - \frac{\partial I_n^H}{\partial l_\partial}$.

Приймалося, що напруженість поля E змінюється тільки вздовж дуги [98]:

$$\frac{\partial E}{\partial l_\partial} = \frac{1}{\pi \cdot r^2 \cdot l_\partial \cdot \epsilon_0} \cdot \int_0^{t_\partial} I_n^H dt, \quad (3.24)$$

де t_∂ – час горіння дуги за період, с; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Кл/В·м – електромагнітна проникність, r – радіус стовпа дуги, м.

Дане рівняння зводиться до виду :

$$\frac{\pi \cdot r^2 \cdot \varepsilon_0 \cdot \left(\frac{\partial E}{\partial l_\partial} \right)}{dt} = I_H. \quad (3.24')$$

При атмосферному тиску напруженість поля визначається за виразом [98]:

$$E = 2,05 \cdot 10^8 \cdot \frac{U_i^{12} \cdot g_e^{\frac{1}{3}}}{I_\partial^{\frac{1}{3}} \cdot \chi^{\frac{1}{3}}}, \quad (3.25)$$

де $U_i = 14,3$ єВ – потенціал іонізації дугової плазми, $g_e = 25,0 \cdot 10^{-20}$ м² – перетин Рамзауєра, $\chi = 1,55$ – відношення статистичної ваги одноразово заряджених іонів до статистичної ваги атому у нормальному стані (дані для Fe).

Тоді має місце система:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\pi \cdot r^2 \cdot \varepsilon_0 \cdot \left(\frac{\partial E}{\partial l_\partial} \right)}{dt} = I_H \\ E = 2,05 \cdot 10^8 \cdot \frac{U_i^{12} \cdot g_e^{\frac{1}{3}}}{I_H^{\frac{1}{3}} \cdot \chi^{\frac{1}{3}}} \\ \frac{\partial I_H}{\partial t} = \frac{\partial I_H}{\partial l_\partial} \frac{\partial l_\partial}{\partial t} \end{array} \right. \quad (3.26)$$

Рішення даної системи наведено у роботі [99]:

$$\frac{\partial I_H}{\partial l_\partial} = - \sqrt{\left(\frac{3 \cdot I_H}{8 \cdot l_\partial} \right)^2 + \frac{9}{4} \cdot \frac{I_H^{\frac{10}{3}}}{G \cdot \pi \cdot r^2 \cdot l_\partial \cdot \varepsilon_0 \cdot \left(\frac{\partial l_\partial}{\partial t} \right)}}, \quad (3.27)$$

де $G = 2,05 \cdot 10^8 \cdot \frac{U_i^{12} \cdot g_e^{\frac{1}{3}}}{\chi^{\frac{1}{3}}}$ – постійна, що враховує характеристики плазми, які

є постійними. З аналізу (33) видно, що другий доданок під радикалом прямує до

нескінченості, тоді $\left| \frac{\partial I_H}{\partial l_\partial} \right| \rightarrow \infty$, що характерно для моменту короткого замкнення.

Тоді вираз (3.27) можна трактувати наступним чином: у період часу від 0 до t_1 стан короткого замкнення характеризує другий доданок під радикалом, період від t_1 до

t_2 буде відповідати горінню дуги від максимального значення сили струму I_{max}^H , що відповідає V_{max} , до номінального значення I_n . Тоді вираз (3.27) прийме вигляд:

$$\left| \frac{\partial I_n}{\partial l_\partial} \right|_{t_1} + \left| \frac{\partial I_n}{\partial l_\partial} \right|_{t_2} = \sqrt{\left(\frac{3 \cdot I_n}{8 \cdot l_\partial} \right)^2 + \frac{9}{4} \cdot \frac{I_n^{\frac{10}{3}}}{G \cdot \pi \cdot r^2 \cdot l_\partial \cdot \epsilon_0 \cdot \left(\frac{\partial l_\partial}{\partial t} \right)}} \quad (3.27')$$

Дане рівняння можна звести до наступної системи:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left| \frac{\partial I_n}{\partial l_\partial} \right|_{t_1} = \sqrt{\frac{9}{4} \cdot \frac{I_n^{\frac{10}{3}}}{G \cdot \pi \cdot r^2 \cdot l_\partial \cdot \epsilon_0 \cdot \left(\frac{\partial l_\partial}{\partial t} \right)}}, 0 < t \leq t_1 \\ \left| \frac{\partial I_n}{\partial l_\partial} \right|_{t_2} = \sqrt{\left(\frac{3 \cdot I_n}{8 \cdot l_\partial} \right)^2}, t_1 < t \leq t_2 \end{array} \right. \quad (3.27'')$$

Перше рівняння системи прямує до нескінченості та не розглядається. Друге рівняння при початкових умовах $I|_{t_1} = I_{max}^H$, $I|_{t_2} = I_n$, де I_n – номінальне значення сили струму наплавлення. Рішенням цього рівняння буде вираз:

$$I_n = I_{max}^H - D \cdot l_\partial^{\frac{3}{8}} \quad (3.28)$$

Введення коефіцієнту D обумовлено розмірністю, яка буде $A / m^{\frac{3}{8}}$. Детальний аналіз виразу (3.28) виявив, що D не тільки коригує розмірність, але й визначає природу саморегулювання дуги в залежності від її довжини [87]. Так, для дуги великої довжини, що горить у середовищі CO_2 та живиться від джерела живлення з жорсткою характеристикою, зміна довжини дуги є причиною зміни сили струму, що обумовлено перерозподілом енергії між стовпом дуги та приелектродними зонами, що є причиною зміни коефіцієнту розплавлення зварювального дроту. Для дуги ж малої довжини зміна сили струму обумовлена зміною ЕДС самоіндукції зварювальної мережі.

Таким чином, значення коефіцієнту D для дуги з початковою довжиною $l_{\partial 0} = 4,0$ мм можна оцінити за допомогою (3.15) та (3.19) та осцилограм (рис. 3.3), з

яких видно, що сила струму змінюється в інтервалі від $I_{max}^H = (400,0 - 500,0)$ А до $I_H = 125,0$ А при $t = 0,025$ с майже при всіх значеннях параметрів коливань. Довжина дуги l_∂ за своєю природою являє собою суму від двох процесів: 1-го процесу плавлення та подавання електроду, що описується виразом (3.15); 2-го процесу зміни положення зварювальної ванни за рахунок коливань – за (3.19). Але, як видно, при заданих складових довжина дуги за виразом (3.15) не перевищує 0,0013 м у той час, як за виразом (3.19) довжина дуги змінюється у межах

$$0 \leq l_{\partial 0} - \sqrt{l_0^2 + \left(\frac{L}{2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot \nu \cdot 0,025)\right)^2} \leq 0,002 \text{ м, тобто завдяки коливанням}$$

зварювальна дуга збільшиться на 2,0 мм. Тоді сумарне максимальне відхилення довжини від значення $l_{\partial 0}$ не буде перевищувати 3,3 мм, що свідчить про незначну зміну довжини дуги, яка є короткою. Тоді коефіцієнт D буде розмірним

коефіцієнтом, а його значення $D = 1,0 \text{ А/м}^{\frac{3}{8}}$, а значення струму за виразом (3.28)

зміниться не більше, ніж на 0,12 А, що доводить майже відсутню залежність між величиною струму наплавлення та довжиною дугового проміжку, що свідчить про

неможливість використання (3.28) для визначення залежності $\left| \frac{\partial I_H}{\partial l_\partial} \right|$ у випадку

короткої довжини дуги. У випадку ж великої довжини дуги коефіцієнт D має визначатись з урахуванням процесів перерозподілу електричного потенціалу між приелектродними зонами та стовпом дуги.

На підставі отриманих даних можна зазначити, що керувати величиною сили струму наплавлення у період його спаду, що відповідає інтенсивному зростанню об'єму краплі металу дроту, за допомогою амплітудно частотних характеристик коливань в заданих умовах неможливо.

3.6 Висновки до розділу 3

1. На основі критерію суцільності виведена аналітична залежність (3.11) швидкості наплавлення від параметрів коливань деталі, що наплавляється.

Показано, що окрім величин амплітуди і частоти коливань, швидкість наплавлення залежить від співвідношення l/L – ширини наплавленого валика l , що отриманий без впливу коливань, до розмаху коливань L , при яких здійснюється наплавлення при тому самому значенню струму наплавлення; певного числа n , яке визначає саме ступінь суцільності валика. Встановлено оптимальне значення $n = 4,5 - 6,5$ та діапазон швидкостей наплавлення від $0,0025$ м/с до $0,0077$ м/с.

2. Аналіз на основі осцилограм дозволив встановити вплив коливань деталі на період горіння дуги. Показано, що у порівнянні з величиною періоду горіння дуги без впливу коливань його значення майже не змінюється за частоти у $3,0$ Гц, але за частоти у $4,5$ Гц збільшується на $56,0\%$ - $74,0\%$ в залежності від величини амплітуди. Час існування рідкої перемички при замкненні у $1,8$ рази менше при використанні зовнішніх коливань.
3. На основі аналізу осцилограм було отримано аналітичну залежність (3.21) величини періоду горіння дуги від параметрів коливань та швидкісних характеристик плавлення та подавання електродного дроту. Встановлено, що дана залежність має діапазон похибки від $7,8\%$ до $31,4\%$ за силою струму у $125,0$ А, та за швидкістю наплавлення у $0,005$ м/с.
4. Встановлено, що похибка залежності (3.21) обумовлена недостатньою кількістю вимірів за осцилограмами величини періоду горіння дуги t , а також впливом коливань деталі на стабільність горіння дуги, що обумовлює збільшення ступеню розбризкування електродного металу в умовах коливань особливо за частоти у $4,5$ Гц. Похибка у вимірі струму наплавлення в межах від $26,0\%$ до $44,0\%$ не впливає на кінцевий результат розрахунку за (3.21).
5. Оцінки впливу коливань деталі на залежність (3.21) є:
 - за критерієм стабільності, що визначає значення коефіцієнта варіації – дуга, що горить в умовах коливань є менш стабільною, а саме: значення

- коефіцієнта кореляції збільшується на 18,6 % - 75,0 % у порівнянні з наплавленням без такого коливального впливу;
- ступінь розбризкування у порівнянні з режимом наплавлення без впливу коливань деталі зростає за діапазоном від 1,48 рази до 3,0 разів у діапазонах досліджених амплітуд і частот.
6. Встановлено, що значення кількості виділеної електричної енергії в дуговому проміжку за час наплавлення 6,0 с завдяки коливанням знаходиться в межах від 21,606 кДж до 22,355 кДж, що майже таке саме, що й при наплавленні без впливу коливань – 20,956 кДж. Тобто значення кількості виділеної електричної енергії в дуговому проміжку за час наплавлення 6,0 с дуги зростає на 4,0 % - 6,7 %. Даний факт свідчить, що пріоритетність у збільшенні долі розбризкування відіграє саме фактор коливань дуги, а не перегрів краплі розплавленого електродного металу дугою. Саме фактор примусових коливань деталі, що наплавляється, та, відповідно, зварювальної ванни, ймовірно, є джерелом тангенціальної складової сили інерції, що діє на рідку металеву перемичку між поверхнею розплаву зварювальної ванни та твердою фазою електродного дроту, що й обумовлює зниження стабільності процесу наплавлення та збільшує ступінь розбризкування.
7. На основі аналітичного вирішення рівняння Гауса щодо напруженості електричного поля вздовж дуги доведено, що зміна струму після короткого замкнення від свого максимального значення до номінального не залежить від зміни довжини дуги при малому її значенні, а саме до 4,0 мм - 5,0 мм, що унеможливорює керування процесом формування краплі електродного металу за посередництвом коливань відповідного типу поверхні деталі, що наплавляється.

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЧНОГО РЕЖИМУ НАПЛАВЛЕННЯ В УМОВАХ ПРИМУСОВИХ ПОПЕРЕЧНИХ КОЛИВАНЬ ЗВАРЮВАЛЬНОЇ ВАННИ НА ГЕОМЕТРИЧНІ РОЗМІРИ ВАЛИКА ТА ВЛАСТИВОСТІ ЗВАРНОГО З'ЄДНАННЯ «ОСНОВНИЙ-НАПЛАВЛЕНИЙ МЕТАЛ»

4.1 Підготовка експериментальної бази

Як відомо, основними факторами впливу на метал, що наплавляється, та ЗТВ є струм наплавлення, напруга на дузі, швидкість наплавлення та подачі електродного дроту, а також витрати вуглекислого газу. У випадку з використанням коливань зварювальної ванни безпосередній вплив на формування металу валика, що наплавляється, та ЗТВ мають частота та амплітуда коливань. Окрім означених факторів, які є кількісними, також буде визначатися якісний фактор – формування наплавленого валика, що буде оцінюватись за трьома показниками: незадовільно, задовільно, добре.

Дослідження впливу вищезначених параметрів на наплавлений метал та метал ЗТВ здійснювалось за методикою раціонального планування експерименту. Алгоритм методики ґрунтується на послідовному виконанні наступних пунктів:

- обґрунтоване визначення незалежних факторів з вищезначених параметрів технологічного та коливального процесів, а також діапазон зміни кожного з них;
- побудова плану проведення експериментів;
- проведення експериментів за планом та отримання зразків;
- обробка наплавлених зразків для подальших дослідів.
- формування бази даних значень експериментальних даних.

Визначення незалежних факторів

Струм і напруга. Як відомо, ці найважливіші енергетичні характеристики зварювального процесу взаємопов'язані за допомогою вольт-амперної характеристики через електричний опір зварювальної дуги, що не є сталим. Таким чином у якості незалежного можна обирати будь який з цих факторів.

У більшості літературних джерел з технології зварювання та наплавлення викладення матеріалу базується саме на залежності напруги (напруженості) на дузі від зварювального струму [73, 98].

Залежність зварювального струму від частоти та амплітуди коливань зварювальної ванни відсутня для умов горіння дуги, що мають місце у досліджуваних процесах наплавлення, що доведено у пункті 3.5 розділу 3 даної дисертаційної роботи.

Таким чином, у подальших дослідах сила струму визначається як незалежний фактор. Зазвичай діапазон зварювального струму при наплавленні у CO_2 для діаметру зварювального дроту 1,2 мм лежить у межах від 100,0 А до 250,0 А. У даній роботі фактор зварювального струму буде обмежений до 200,0 А відповідно до можливостей зварювального напівавтомату ПШ – 107В та лежатиме у діапазоні від 100,0 А до 200,0 А з кроком зміни 25,0 А: 100,0 А, 125,0 А, 150,0 А, 175,0 А, 200,0 А.

Швидкість наплавлення і швидкість подачі електродного дроту. Вибір величини швидкості наплавлення обумовлений критерієм зберігання геометричної подоби зварювальної ванни, що дає змогу отримувати наплавлені валики заданої форми з високою технологічною міцністю. Цей критерій визначається певним коефіцієнтом Z , який визначається в залежності від діаметра електродного дроту, та лежить у межах від $2,0 \cdot 10^3$ А·м/год до $25,0 \cdot 10^3$ А·м/год. Тоді значення швидкості наплавлення визначається таким чином [73]:

$$V_n = \frac{Z}{I_n}. \quad (4.1)$$

В умовах коливань зварювальної ванни формування наплавленого валика буде відбуватися в умовах, що значно відрізняються від умов використання цієї формули: основним критерієм буде саме забезпечення суцільності валика, а тому формула (4.1) є некоректною щодо визначення впливу струму на швидкість наплавлення. Тому, відповідно до пункту 3.1 розділу 3, значення фактору швидкості приймається незалежним параметром технологічного режиму наплавлення, що лежить за діапазоном від 0,0025 м/с до 0,0077 м/с, а саме від 0,0028 м/с до 0,0072 м/с з кроком зміни 0,0011 м/с: 0,0028 м/с, 0,0039 м/с, 0,005 м/с, 0,0061 м/с, 0,0072 м/с. Границі обраного діапазону від 0,0028 м/с до 0,0072 м/с обумовлені технічними можливостями електроприводу 7 рухомої каретки станини (рис. 2.7, розділ 2).

Швидкість подавання електродного дроту при постійній його подачі визначалась за значенням струму наплавлення та діаметром електродного дроту за виразом (2.5) розділу 2, з якого видно, що швидкість подачі електродного струму є залежною від іншого фактору та не розглядається у подальших дослідях.

Витрати вуглекислого газу. Значення цього параметру обираються в залежності від сили струму та товщини заготовки, на яку здійснюється наплавлення. У даній роботі величина витрат газу варіювалася у межах від 15,0 л/хв до 25,0 л/хв. відповідно до змін зварювального струму за рекомендаціями виробника зварювального дроту *ER70S-6* [71], що дає підстави не розглядати цей параметр як незалежний.

Амплітуда і частота коливань зварювальної ванни. Значення цих параметрів обираються програмно й незалежно від будь яких інших факторів. Вплив амплітуди й частоти є ключовою особливістю дослідів. Відповідно, обидва ці фактори розглядаються як незалежні. Діапазон зміни амплітуди є від 0,003 м до 0,007 м з кроком 0,001 м: 0,003 м, 0,004 м, 0,005 м, 0,006 м, 0,007 м; частоти – від 2,5 Гц до 4,5 Гц з кроком змін 0,5 Гц: 2,5 Гц, 3,0 Гц, 3,5 Гц, 4,0 Гц, 4,5 Гц.

З даного аналізу витікає, що пошук основного впливу на наплавлений метал та метал ЗТВ необхідно шукати в залежності від сили струму наплавлення,

швидкості наплавлення, амплітуди й частоти коливань зварювальної ванни та їх комбінацій.

Побудова плану експериментів

Побудова плану була обумовлена задоволенням 2 критеріїв: 1. проведення мінімальної кількості експериментів з урахуванням усіх незалежних факторів; 2. використання якомога більшої кількості рівнів факторів із заданого діапазону.

Взагалі щодо досягнення основної мети регресійного аналізу емпіричних кількісних даних – побудова залежностей між незалежними факторами та об'єктом дослідження – використовується 2 основних методи: повний факторний експеримент [100] - [102] та методика раціонального планування експерименту на базі побудови латинського квадрату [103].

Якщо брати за основу другий критерій побудови плану, то повний факторний експеримент вимагає для успішної побудови регресійної моделі проведення $N = k^n$ дослідів, де n – кількість факторів, а k – кількість рівнів факторів. Тобто, у даній роботі є 4 фактори та кожний з яких має 5 рівнів, то необхідно провести 625 експериментів, що є неприйнятним або треба зменшувати кількість факторів чи їх рівнів, що може негативно впливати на встановлення зв'язку між факторами, а також знижує точність майбутньої моделі. З іншого боку, використовуючи план, побудований за методом “латинського квадрату”, можна кількість експериментів зменшити у k^2 , тобто у 25 разів без будь якої втрати зв'язку між факторами, що якраз відповідає зразу 2 критеріям.

Таким чином, було обрано метод побудови плану експериментів за принципом “латинського квадрату” в даній дисертаційній роботі. Відповідно до методики Протодьяконова, викладеної у роботі [103], було побудовано план експериментів, що схематично зображений на рисунку 4.1. Відповідно до рисунку, простір, що відповідає серії з 625 експериментів розбитий на 625 клітинок. Кожна клітинка відповідає єдиній комбінації рівнів обраних незалежних факторів: I_n – струму наплавлення, V_n – швидкості наплавлення, A – амплітуди коливань зварювальної ванни, ν – частоти коливань зварювальної ванни. Рівні цих факторів відкладаються

Згідно з побудованим планом експерименту, технологічні та коливальні режими необхідної серії експериментів наведені у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Технологічні та коливальні режими експериментів наплавлення

Номер експерименту	Сила струму наплавлення I_n , А	Швидкість наплавлення V_n , м/с	Частота коливань ν , Гц	Амплітуда коливань A , м
1	100,0	0,0028	4,0	0,007
2	100,0	0,0039	3,5	0,006
3	100,0	0,005	4,5	0,003
4	100,0	0,0061	2,5	0,004
5	100,0	0,0072	3,0	0,005
6	125,0	0,0028	3,5	0,003
7	125,0	0,0039	3,0	0,007
8	125,0	0,005	4,0	0,004
9	125,0	0,0061	4,5	0,005
10	125,0	0,0072	2,5	0,006
11	150,0	0,0028	4,5	0,006
12	150,0	0,0039	4,0	0,005
13	150,0	0,005	2,5	0,007
14	150,0	0,0061	3,0	0,003
15	150,0	0,0072	3,5	0,004
16	175,0	0,0028	3,0	0,004
17	175,0	0,0039	2,5	0,003
18	175,0	0,005	3,5	0,005
19	175,0	0,0061	4,0	0,006
20	175,0	0,0072	4,5	0,007
21	200,0	0,0028	2,5	0,005
22	200,0	0,0039	4,5	0,004
23	200,0	0,005	3,0	0,006
24	200,0	0,0061	3,5	0,007
25	200,0	0,0072	4,0	0,003

Значення напруги на дузі визначалось за виразом (2.6), а швидкість подачі електродного дроту – за виразом (2.5) розділу 2, (табл. 4.3).

Відповідно до обраних значень сили струму та швидкості наплавлення, частоти та амплітуди коливань деталі, що наплавляється, значення погонної енергії g_n процесу наплавлення з коливаннями та без них визначається за виразом [45], Вт/м:

$$g_n = \frac{\eta \cdot I_n \cdot U_n}{V_n}, \quad (4.2)$$

де $\eta = 0,72 - 0,92$ – ефективний ККД нагріву виробу зварювальною дугою, що горить в середовищі CO_2 [92].

Таблиця 4.3 – Значення сили струму та відповідної напруги на дузі і швидкості подачі електродного дроту

Сила струму наплавлення I_n , А	Напруга на дузі U_n , В	Швидкість подачі електродного дроту V_{nd} , м/ГОД.
100,0	23,5	109,6
125,0	24,7	160,6
150,0	25,8	221,0
175,0	27,0	291,0
200,0	28,0	370,3

Формула (4.2) відповідає процесу наплавлення, що здійснюється прямолінійно з постійною швидкістю наплавлення. У випадку коливань поверхні деталі, що наплавляється, за гармонійним законом $y = \frac{L}{2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot \nu \cdot t)$, у виразі для погонної енергії з'явиться додаткова складова швидкості у поперечному напрямку V_n^n , яка буде дорівнювати $V_n^n = \frac{\partial y}{\partial t} = L \cdot \pi \cdot \nu \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot \nu \cdot t)$. Так як процес коливань є періодичним, то достатньо визначити миттєве значення складової швидкості V_n^n в момент часу t , що відповідає періоду коливань $t_n = \frac{1}{\nu}$. Тоді

$$V_n^n = \frac{\partial y}{\partial t} = L \cdot \pi \cdot \nu \cdot \cos\left(2 \cdot \pi \cdot \nu \cdot t_n\right) = L \cdot \pi \cdot \nu \cdot \cos\left(2 \cdot \pi \cdot \nu \cdot \frac{1}{\nu}\right) = L \cdot \pi \cdot \nu.$$

Відповідно, вираз (4.2) буде мати вигляд:

$$g_n = \frac{\eta \cdot I_n \cdot U_n}{\sqrt{(V_n^n)^2 + (V_n)^2}} = \frac{\eta \cdot I_n \cdot U_n}{\sqrt{(L \cdot \pi \cdot \nu)^2 + (V_n)^2}}. \quad (4.2')$$

Згідно з формулою (4.2') можна оцінити мінімальне і максимальне значення погонної енергії для режимів наплавлення з коливаннями та без них у відповідності до таблиць 4.2 та 4.3, що наведено у таблиці 4.4 за середнім значенням ефективного ККД нагріву виробу зварювальною дугою $\eta = 0,82$.

Таблиця 4.4 – Максимальні та мінімальні значення погонної енергії g_n процесу наплавлення з коливаннями та без них

Параметр	Максимальне значення	Мінімальне значення
Сила струму наплавлення I_n , А	200,0	100,0
Напруга на дузі U_n , В	28,0	23,5
Швидкість наплавлення V_n , м/с	0,0072	0,0028
Частота коливань ν , Гц	4,5	2,5
Амплітуда коливань A , м	0,007	0,003
Миттєве значення складової швидкості V_n^n , м/с	0,198	0,047
Значення погонної енергії g_n процесу наплавлення з коливаннями, кДж/м	97,529	9,726
Значення погонної енергії g_n процесу наплавлення без коливань, кДж/м	1640,0	267,64

З наведених даних таблиці 4.4 видно, що фактор коливань суттєво знижує вклад питомої енергії у основний метал під час наплавлення в порівнянні з режимами без впливу коливань: мінімальне значення знижується у 27,5 рази, максимальне – у 16,8.

Якість формування наплавлених валиків визначалася за наявності дефектів, типи яких регламентовані у ДСТУ-Н Б А.3.1-11:2008 (рис. 4.2).

Ступінь наявності дефектів відповідала оцінкам: добре – мінімальна кількість дефектів, задовільно – присутність значних візуальних дефектів, але із збереженням загальної суцільності валика, незадовільно – втрата суцільності.

З 25 отриманих зразків за оцінкою якості було отримано: з оцінкою “добре” – 13; з оцінкою “задовільно” – 10; з оцінкою “незадовільно” – 1 (табл. 4.5).

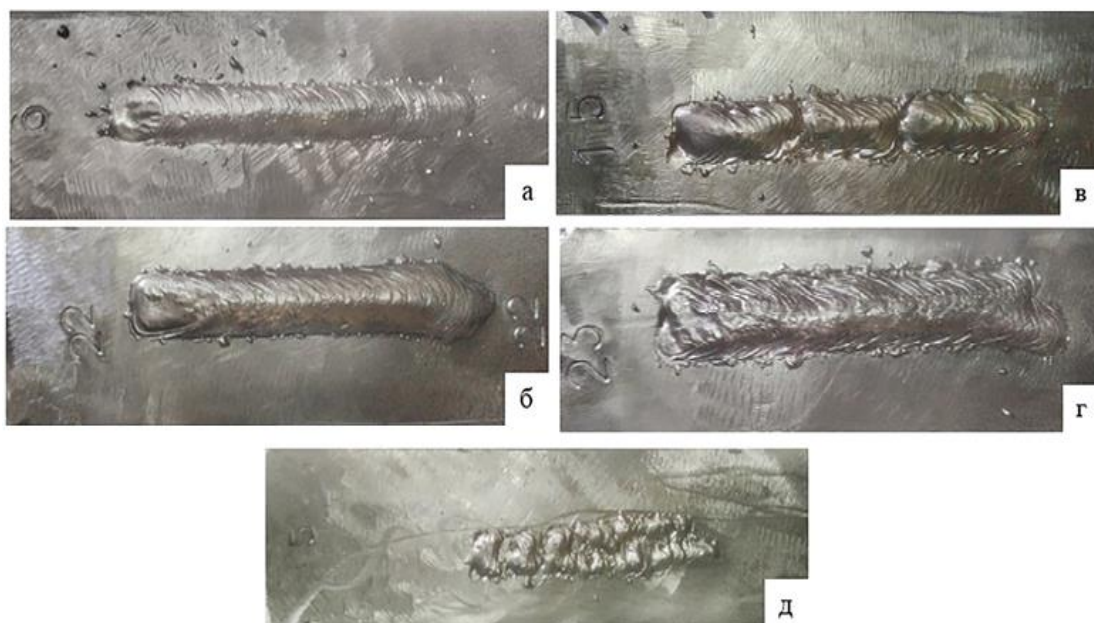


Рисунок 4.2 – Зовнішній вигляд деяких наплавлених зразків, отриманих за планом експериментів з оцінкою: а, б – “добре», в, г – “задовільно”, д – “незадовільно”

Формування бази даних значень експериментальних даних

Як показано у розділі 1, основною причиною підвищення експлуатаційної якості наплавленого металу є підвищення ступеню диспергування його мікроструктури. Основним показником цього виступає величина кристаліту. Таким чином, кількісним критерієм впливу коливань зварювальної ванни на покращення мікроструктури є розмір зерна кристаліту наплавленого металу. Визначення розміру зерна та геометричних розмірів валиків виконувалось у відповідності до методів: травлення; оптичної та растрової мікроскопії; підрахунку перетину границь зерен. Дані вимірів наведені у таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Виміряні значення середнього умовного діаметру зерна у наплавленому металі, геометричні розміри валиків та оцінка формування валиків, де символом * позначені режими наплавлення без коливань деталі

№ Зразка	Середній умовний діаметр зерна δ , мкм									Геометричні розміри валиків, мм		Формування валику
	Верх валику			Центр валику			Низ валику			Ширина $W_{в\text{алик}}$	Висота b	
	Max	Min	Середнє	Max	Min	Середнє	Max	Min	Середнє			
1*	280	240	258	250	180	208	100	60	82	10,32	4,18	добре
1	100	40	65	200	80	113	100	40	57	18,8	2,7	задовільно
2	160	80	105	140	80	108	80	40	54	13,6	2,8	задовільно
3	140	50	90	140	60	101	60	40	46	9,6	4,04	добре
4	40	20	25	120	40	67	40	15	26	10,96	3,02	задовільно
5	150	90	48	50	20	58	20	10	37	10,3	3	незадовільно
6	100	60	78	120	50	90	70	50	57	13,2	4,0	добре
7*	120	100	127	180	100	148	60	40	46	10,8	2,8	добре
7	60	30	67	100	40	116	120	30	56	17,2	3,9	задовільно
8	100	40	69	120	70	100	50	30	35	11,8	3,5	добре
9	160	70	114	100	50	70	90	40	59	18,0	2,9	добре
10	-	-	-	80	45	55	40	20	26	12,4	2,5	задовільно
11	130	100	117	150	60	120	50	30	42	17,9	5,2	добре
12	120	80	97	150	100	132	60	30	45	14,3	4,5	добре
13*	40	30	36	150	60	113	100	40	65	11,9	5,3	задовільно
13	50	30	36	80	25	43	50	30	39	15,8	3,2	задовільно
14	130	60	79	180	140	159	80	30	48	10,8	4,0	добре
15	170	80	110	120	50	79	40	20	30	13,8	3,0	задовільно
16	200	170	185	250	120	176	80	50	64	15,4	4,9	добре
17	60	40	48,5	80	40	52,5	40	25	30	11,7	5,6	добре
18	200	80	130	180	60	133,5	80	30	48,5	14,0	4,6	добре
19*	120	70	88,6	180	80	133	40	25	34	8,8	5,2	задовільно
19	240	120	155	180	60	130	80	30	43	14,1	3,8	добре
20	100	30	55	120	50	77	80	40	57	9,0	3,7	задовільно
21	-	-	-	250	90	174	60	40	53,3	15,7	6,8	задовільно
22	100	40	60	120	60	90	70	30	48,3	13,8	6,3	добре
23	200	80	147	250	120	195	60	30	47	15,8	4,9	задовільно
24	230	110	162	250	60	108,3	60	15	30	19,0	7,4	задовільно
25*	80	30	50	75	35	53	30	20	24	7,8	6,4	добре
25	180	60	109	160	30	89	60	15	40	11,3	4,7	добре

Під впливом коливань найбільш суттєво змінюються такі механічні властивості як твердість [35], [44], [52], [55], [58], [62], текучість [58], [59], [60], ударна в'язкість [33], [34], [48], [50], [56], [62], витривалість [49], [54], [57] міцність [32], [43], [53], [58], [59], [62]. Таким чином, комплекс службових властивостей металу, що змінюються під зовнішнім періодичним впливом, є досить великим та його дослідження є тривалою та дорогою задачею. Виникає потреба у призначенні такого інтегрованого критерію вивчення впливу коливань деталі, що наплавляється, який дозволяв би визначати й вплив на інші властивості.

Відомо, що вимірювання твердості має 3 різновиди: метод вдавлювання, метод шкрябання та метод удару (відскоку).

Вдавлювання індентора впливає на метал таким чином, що деформацію зазнає той об'єм металу, що знаходиться безпосередньо під індентором, а навколишній метал залишається недеформованим. Такий тип впливу обумовлює виникнення дотичних напружень у металі, які є чинниками розвитку пластичної деформації. Таким чином, метод вдавлювання характеризує перш за все опір пластичній деформації. Відповідно метод шкрябання характеризує опір руйнуванню, тобто обумовлює границю міцності, а метод удару (відскоку) – пружні властивості металу. Тоді за певний порівняльний критерій міцності наплавленого металу та металу ЗТВ можна прийняти показник твердості [104]. Методики, що дозволяють визначати показники границі текучості, ударної в'язкості, границі міцності на розрив, відносного звуження та видовження як функції від значення твердості викладені у відповідних роботах [105], [106]. Таким чином, інтегрованим критерієм щодо вивчення впливу коливань деталі обрано значення твердості наплавленого металу та металу ЗТВ. Вимірювання твердості металу наплавлених валиків здійснювалось за методом Віккерса, результати наведені у таблиці 4.6.

Будь який процес наплавлення регламентований двома вимогами: забезпечення мінімального ступеня перемішування наплавленого металу з основним; забезпечення мінімального розміру ЗТВ. Задоволення цих вимог у даній роботі забезпечується завдяки коливанням зварювальної ванни, що буде

призводити до зміни ширини та висоти валика, а також збільшувати ступінь ефективності процесу наплавлення.

Таблиця 4.6 – Значення твердості наплавленого металу та металу ЗТВ, де символом * позначені режими наплавлення без коливань деталі

№ Зразка	Значення твердості наплавленого металу <i>H</i> , МПа			Значення твердості металу ЗТВ <i>H_{ЗТВ}</i> , МПа		
	Верх валику	Центр валику	Низ валику	ДКЗ	ДДЗ	ДНП
1*	1630,0	1780,0	1615,0	1575,0	1615,0	1635,0
1	1950,0	1930,0	1870,0	2170,0	2240,0	2080,0
2	1990,0	2030,0	2030,0	2120,0	2030,0	2240,0
3	2170,0	2260,0	2230,0	2540,0	2610,0	2660,0
4	2230,0	2230,0	2330,0	2330,0	2290,0	2290,0
5	2210,0	2010,0	2100,0	2170,0	2140,0	2210,0
6	2050,0	1990,0	2170,0	2080,0	2070,0	2080,0
7*	1610,0	1670,0	1720,0	1720,0	1650,0	1750,0
7	2180,0	2190,0	2220,0	2100,0	2180,0	2140,0
8	2220,0	2240,0	2320,0	2500,0	2450,0	2480,0
9	2500,0	2320,0	2290,0	2700,0	2750,0	2720,0
10	2600,0	2790,0	2710,0	3200,0	3130,0	3170,0
11	2140,0	2140,0	2240,0	2020,0	2050,0	2050,0
12	2290,0	2290,0	2290,0	2450,0	2430,0	2450,0
13*	2050,0	2230,0	2150,0	2040,0	1970,0	2000,0
13	2140,0	2100,0	2100,0	1970,0	1930,0	1950,0
14	2220,0	2170,0	2320,0	2580,0	2600,0	2640,0
15	2510,0	2570,0	2510,0	2830,0	2870,0	2870,0
16	2080,0	2070,0	2030,0	2200,0	2220,0	2250,0
17	2020,0	1730,0	1780,0	1730,0	1780,0	1750,0
18	2080,0	2140,0	2240,0	2280,0	2280,0	2300,0
19*	2210,0	2310,0	2140,0	1970,0	2070,0	2110,0
19	2220,0	2190,0	2380,0	2270,0	2320,0	2290,0
20	2080,0	2190,0	2120,0	2290,0	2280,0	2290,0
21	1930,0	1930,0	1920,0	2000,0	1980,0	2030,0
22	2190,0	2250,0	2290,0	2250,0	2290,0	2290,0
23	2170,0	2260,0	2180,0	2130,0	2150,0	2140,0
24	2160,0	2140,0	2100,0	2170,0	2180,0	2190,0
25*	1930,0	1970,0	2100,0	1820,0	1840,0	1820,0
25	2030,0	2050,0	1790,0	2150,0	2150,0	2130,0

4.2 Побудова регресійних моделей щодо визначення твердості наплавленого металу, металу ЗТВ, висоти наплавленого валику, середнього умовного діаметру зерна наплавленого металу та визначення основних параметрів їх достовірності

В даній роботі регресійною моделлю є модель загального вигляду, що являє собою поліном [107]:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot \varphi_1(I_n, V_n, A, \nu) + \dots + \beta_{k-1} \cdot \varphi_{k-1}(I_n, V_n, A, \nu) + \varepsilon, \quad (4.3)$$

де Y – відгук. За змістом задач, що потребують вирішення, Y є величиною твердості, розміру кристаліту та висоти наплавленого валика. Відповідно до пункту 4.1.1 даного розділу, за незалежні фактори прийняті значення сили струму наплавлення I_n , швидкості наплавлення V_n , амплітуди A та частоти ν коливань зварювальної ванни.

$\varphi_i(I_n, V_n, A, \nu)$ – функції, що являють собою комбінацію незалежних факторів та їх ступенів, ε – вектор випадкових помилок, $i = 1, 2, \dots, k-1$ – кількість членів поліному (4.3).

$\beta_0, \beta_1, \beta_{k-1}$ – параметри регресії, що підлягають визначенню.

Ступінь поліному зазвичай не перевищує кубічної, що обумовлено достатньою точністю розрахункових значень [108].

Параметри регресії визначаються за допомогою метода найменших квадратів [101], [107], що регламентує виконання принципу мінімуму:

$$\frac{\partial Q}{\partial \beta_i} = 0, \quad (4.4)$$

де $i = 1, 2, \dots, k-1$; Q – квадрат різниці між дійсним (вимірним) значенням залежної величини y_i (табл. 4.5, 4.6) та її значенням, розрахованим за рівнянням множинної регресії $\tilde{y} = \beta_0 + \beta_1 \cdot \varphi_{1i} + \dots + \beta_{k-1} \cdot \varphi_{(k-1)i}$. Тобто має місце вираз:

$$Q(\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{k-1}) = \sum_{i=1}^n (y_i - \tilde{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n \left[y_i - \left(\beta_0 + \beta_1 \cdot \varphi_{1i} + \dots + \beta_{k-1} \cdot \varphi_{(k-1)i} \right) \right]^2. \quad (4.5)$$

Відповідно до заданого принципу (4.4) формується система лінійних алгебраїчних рівнянь:

де S – оцінка стандартного відхилення помилок експериментів у функції прогнозу значення \tilde{y}_i . Залишки, відповідно до вищезначених умов, є незалежними нормально розподіленими випадковими величинами з нульовими середніми та рівними дисперсіями, що перевірялось гіпотезою за допомогою критерія χ^2 .

Значимість моделі (4.3) оцінювалась за критерієм Фішера та відносно випадкової величин p , що має розподіл Фішера; ступінь значимості кожного з факторів $\varphi_i(I_n, V_n, A, v)$ моделі (4.3) визначався відносно випадкової величин p' , що має розподілення Ст'юдента; ступінь відповідності отриманої регресійної моделі до істинної залежності визначався за значенням коефіцієнта детермінації R^2 та наведеного (скоректованого) коефіцієнта детермінації \bar{R}^2 [107].

Для вирішення системи (4.6), а також перевірки отриманої моделі на значимість за наведеними вище критеріями використовувався програмний пакет *STATISTICA (ver.10)* фірми *StatSoft*, завдяки якому отримані наступні регресійні моделі:

$$\begin{aligned}
 H = & 0,0025115325976854 + 0,0000103364256894232 \cdot I_n \cdot v + \\
 & + 0,0058759267308144 \cdot I_n \cdot V_n + 16,6016450907408 \cdot A \cdot V_n - \\
 & - 0,00241590544247108 \cdot I_n \cdot V_n \cdot v + 0,00105829634213171 \cdot I_n \cdot A \cdot v - \\
 & - 44,3442907498056 \cdot A \cdot v \cdot V_n - 0,000000227768144422142 \cdot I_n^2 - \\
 & - 106,349123766147 \cdot V_n^2 - 0,000335306391843706 \cdot v^2 + \\
 & + 41,8181782549147 \cdot A^2 - 0,00000642951116417346 \cdot I_n^2 \cdot V_n + \\
 & + 0,0000416672416763302 \cdot I_n^2 \cdot A + 0,501025022483833 \cdot V_n^2 \cdot I_n + \\
 & + 0,082027586432854 \cdot V_n \cdot v^2 - 1,4548155487319 \cdot I_n \cdot A^2 + \\
 & + 11490,9078052973 \cdot A \cdot V_n^2 + 7752,10268876331 \cdot A^3.
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

Ступінь відповідності отриманої регресійної моделі (4.7) H ($\times 10^6$), МПа до істинної залежності $H = f(A \cdot V_n^2, I_n \cdot A^2, V_n \cdot v^2, V_n^2 \cdot I_n, I_n^2 \cdot A, I_n^2 \cdot V_n, A \cdot v \cdot V_n, I_n \cdot A \cdot v, I_n \cdot V_n \cdot v, A \cdot V_n, I_n^2, V_n^2, v^2, A^2, A^3, I_n \cdot V_n, I_n \cdot v)$ становить 85 % - 88 % відповідно до значень коефіцієнта детермінації $R^2 \approx 0,88$ та наведеного коефіцієнта детермінації $\bar{R}^2 \approx 0,85$.

$$\begin{aligned}
H_{ЗТВ} = & 0,00138438374248352 + 0,0000047627898806255 \cdot I_H \cdot v + \\
& + 0,0148950994312386 \cdot I_H \cdot V_H - 0,00590002870031366 \cdot I_H \cdot A + \\
& + 0,528568771651581 \cdot A \cdot v - 0,723998679511381 \cdot v \cdot V_H - \\
& - 0,0032205414007356 \cdot I_H \cdot V_H \cdot v - 0,178906788144154 \cdot I_H \cdot V_H \cdot A + \\
& + 0,00213983346825101 \cdot I_H \cdot A \cdot v - 0,000000156703463044544 \cdot I_H^2 - \\
& - 0,000024783275040177 \cdot I_H^2 \cdot V_H + 0,0000461175351527008 \cdot I_H^2 \cdot A - \\
& - 0,131046654276521 \cdot A \cdot v^2 + 0,547128381717974 \cdot I_H \cdot V_H^2 + \\
& + 0,160733968102127 \cdot v^2 \cdot V_H - 1,39483213246776 \cdot I_H \cdot A^2 + \\
& + 8676,57593626603 \cdot A^3.
\end{aligned} \tag{4.8}$$

Ступінь відповідності отриманої регресійної моделі (4.8) $H_{ЗТВ}$ ($\times 10^6$), МПа до істинної залежності $H_{ЗТВ} = f(I_H \cdot A^2, V_H \cdot v^2, A \cdot v^2, V_H^2 \cdot I_H, I_H \cdot A, I_H^2 \cdot V_H, I_H \cdot A \cdot v, I_H \cdot V_H \cdot A, I_H \cdot V_H \cdot v, v \cdot V_H, A \cdot v, I_H \cdot v, I_H \cdot V_H, I_H \cdot A, I_H^2, A^3)$ становить 89,0 % - 91,0 % відповідно до значень коефіцієнта детермінації $R^2 \approx 0,91$ та наведеного коефіцієнта детермінації $\bar{R}^2 \approx 0,89$. Слід зазначити, що дана регресійна модель побудована за даними виміру твердості металу ЗТВ у ділянці крупного зерна (ДКЗ), ділянці дрібного зерна (ДДЗ) та ділянці неповного проплавлення (ДНП). Таким чином, дана регресійна модель визначає величину $H_{ЗТВ}$ як середнє значення твердості у даних ділянках.

$$\begin{aligned}
b = & 0,00402241350579902 + 0,0488016166244118 \cdot I_H \cdot V_H - \\
& - 0,0000411959430223047 \cdot I_H \cdot v - 0,0287052714249642 \cdot I_H \cdot A - \\
& - 7,26896089328136 \cdot I_H \cdot V_H \cdot A - 0,00161508861496343 \cdot I_H \cdot V_H \cdot v + \\
& + 2,23592502177433 \cdot A \cdot v - 44,8279512703215 \cdot A \cdot v \cdot V_H + \\
& + 7,59139811606611 \cdot I_H \cdot A^2 + 109880,052734143 \cdot A \cdot V_H^2 + \\
& + 0,0724569545057346 \cdot V_H \cdot v^2 - 0,263351066537645 \cdot A \cdot v^2 + \\
& + 0,000000184845849949989 \cdot I_H^2 \cdot v - 0,0000769507648516169 \cdot I_H^2 \cdot V_H - \\
& - 807,156795889054 \cdot A^2 - 543,714071312503 \cdot V_H^2.
\end{aligned} \tag{4.9}$$

Ступінь відповідності отриманої регресійної моделі (4.9) b (м) до істинної залежності $b = f(A \cdot v \cdot V_H, I_H \cdot V_H \cdot A, I_H \cdot V_H \cdot v, A \cdot v, I_H \cdot A, I_H \cdot v, I_H \cdot V_H, A \cdot V_H^2, I_H \cdot A^2, V_H \cdot v^2, A \cdot v^2, I_H^2 \cdot v, I_H^2 \cdot V_H, A^2, V_H^2)$ становить 92,0 % - 94,0 % відповідно до значень коефіцієнта детермінації $R^2 \approx 0,94$ та наведеного коефіцієнта детермінації $\bar{R}^2 \approx 0,92$.

$$\begin{aligned}
\delta = & 0,000861939780195999 - 0,00000457468054377944 \cdot I_n - \\
& - 0,000152825723295094 \cdot v - 0,099658715277177 \cdot I_n \cdot V_n \cdot A + \\
& + 0,000125847261742664 \cdot I_n \cdot V_n \cdot v + 0,0663135721635428 \cdot I_n \cdot V_n^2 + \\
& + 0,000103968124488349 \cdot I_n \cdot A \cdot v^2 - 0,0378703542888321 \cdot I_n \cdot V_n \cdot A \cdot v^2 + \quad (4.10) \\
& + 13,5922416750269 \cdot I_n \cdot A \cdot v \cdot V_n^2 + 0,00000000417935502751238 \cdot I_n^2 \cdot v - \\
& - 0,000000548232819770337 \cdot V_n \cdot v \cdot I_n^2 - 0,00174124657326777 \cdot V_n \cdot v^2 + \\
& + 2,00770982113061A \cdot V_n \cdot v^2 + 3,40689322091218 \cdot v \cdot V_n^2 - \\
& - 0,00593263564907643 \cdot A \cdot v^2 - 3331,1722125233 \cdot V_n^3.
\end{aligned}$$

Ступінь відповідності отриманої регресійної моделі (4.10), що визначає δ , мкм – середній умовний діаметр зерна наплавленого металу, до істинної залежності $\delta = f(I_n, v, I_n \cdot A \cdot v^2, V_n \cdot v^2, I_n \cdot V_n \cdot A, I_n \cdot V_n \cdot A \cdot v^2, I_n \cdot A \cdot v \cdot V_n^2, A \cdot V_n \cdot v^2, I_n \cdot V_n \cdot v, v \cdot V_n^2, A \cdot v^2, V_n^3, I_n^2 \cdot v, V_n \cdot v \cdot I_n^2, V_n^2 \cdot I_n)$ становить 86,0 % - 89,0 % відповідно до значень коефіцієнта детермінації $R^2 \approx 0,89$ та наведеного коефіцієнта детермінації $\bar{R}^2 \approx 0,86$.

Отримані моделі (4.7) - (4.10) є адекватними та значимими за означеними вище критеріями.

4.3 Аналіз впливу факторів на твердість наплавленого металу, металу ЗТВ та геометричні розміри наплавленого валику

Відповідно до регресійних моделей (4.7) - (4.10) були побудовані наступні графіки щодо визначення найкращих технологічних та коливальних режимів з точки зору максимальних значень ширини, твердості металу наплавленого валику та металу ЗТВ, а також мінімального значення висоти валику. Також завдяки графікам необхідно встановити динаміку сприятливих змін заданих факторів щодо формування прогнозування. По регресійним моделям будувались графіки при постійних значеннях струму за залежностями: $H = f(I_n, V_n, A, v)$; $H_{зтв} = f(I_n, V_n, A, v)$; $b = f(I_n, V_n, A, v)$

Дослідження формування твердості наплавленого металу

Контурні графіки формування твердості наплавленого металу щодо всіх технологічних та коливальних режимів викладені у додатку Б.

З аналізу графіків видно, що взагалі спостерігається два основних типи впливу коливань на формування максимального значення твердості наплавленого металу:

- за $I_n = 100,0$ А та за $125,0$ А у всьому діапазоні швидкостей наплавлення, також за $I_n = 150,0$ А, $V_n = 0,005$ м/с, $V_n = 0,0061$ м/с, $V_n = 0,0072$ м/с та за $I_n = 175,0$ А та $200,0$ А за будь якій швидкості – максимальні значення твердості формуються за діапазоном частот у $2,5$ Гц - $3,0$ Гц або у $4,0$ Гц - $4,5$ Гц за діапазоном амплітуд у $0,003$ м - $0,007$ м. З названих режимів є такі, що дають можливість отримати максимальне значення твердості металу наплавлення як за діапазоном частот у $2,5$ - $3,0$ Гц, так і за діапазоном у $4,0$ Гц - $4,5$ Гц: $I_n = 100,0$ А, $V_n = 0,0061$ м/с, $I_n = 125,0$ А, $V_n = 0,005$ м/с; $I_n = 150,0$ А, $V_n = 0,005$ м/с, $V_n = 0,0072$ м/с; $I_n = 175,0$ А, $V_n = 0,005$ м/с, $V_n = 0,0061$ м/с; $I_n = 200,0$ А, $V_n = 0,0061$ м/с;
- за $I_n = 150,0$ А, $V_n = 0,0028$ м/с, $V_n = 0,0039$ м/с максимальні значення твердості формуються за діапазоном частот у $2,5$ Гц - $3,0$ Гц та амплітуд у $0,004$ м - $0,006$ м;

Таким чином, максимальні значення твердості наплавленого металу формуються найчастіше за діапазоном частот у $2,5$ Гц - $3,0$ Гц та у $4,0$ Гц - $4,5$ Гц. Співвідношення сили струму та швидкості наплавлення визначає значення амплітуди та можливість формування максимального значення твердості на двох частотних діапазонах на одному технологічному режимі. Найефективнішими частотними діапазонами є $2,5$ Гц - $3,0$ Гц та $4,0$ Гц - $4,5$ Гц, а амплітудний – $0,004$ м - $0,007$ м.

Оцінки збільшення значення твердості відносно даних вимірів (табл. 4.6) максимального значення твердості без впливу коливань будуть наступними: за $I_n = 100,0$ А, $V_n = 0,0028$ м/с – $H_{max} = 1780,0$ МПа; максимальне значення з коливаннями на даному технологічному режимі досягається за частоти у $2,5$ Гц, амплітуди у $0,007$ м та лежить за інтервалом у $H_{max}^{кол} = 2500,0$ МПа - $2700,0$ МПа, тобто твердість збільшується на $40,0$ % - $52,0$ %. За $I_n = 125,0$ А, $V_n = 0,0039$ м/с –

$H_{max} = 1720,0$ МПа без коливань; максимальне значення з коливаннями досягається за частоти у 2,5 Гц, амплітуд у 0,004 м - 0,006 м та лежить за інтервалом у $H_{max}^{КОЛ} = 2300,0$ МПа - 2400,0 МПа, твердість збільшується на 33,7 % - 39,5 %. За $I_n = 150,0$ А, $V_n = 0,005$ м/с – $H_{max} = 2230,0$ МПа без коливань; максимальне значення з коливаннями досягається за частоти у 2,5 Гц та 4,5 Гц, амплітуд у 0,004 м - 0,005 м за інтервалом у $H_{max}^{КОЛ} = 2300,0$ МПа - 2400,0 МПа, тобто твердість збільшується на 3,0 % - 7,6 %. За $I_n = 175,0$ А, $V_n = 0,0061$ м/с – $H_{max} = 2310,0$ МПа без коливань; максимальне значення з коливаннями досягається за частоти у 2,5 Гц, амплітуд у 0,005 м - 0,006 м та за частоти у 4,5 Гц і амплітуди у 0,004 м та лежить за діапазоном у $H_{max}^{КОЛ} = 2600,0$ МПа - 2700,0 МПа, тобто твердість збільшується на 12,5 % - 16,8 %. За $I_n = 200,0$ А, $V_n = 0,0072$ м/с – $H_{max} = 2100,0$ МПа без коливань; максимальне значення з коливаннями досягається за частоти у 2,5 Гц, амплітуд у 0,005 м - 0,007 м та лежить у проміжку $H_{max}^{КОЛ} = 2900,0$ МПа - 3200 МПа, тобто твердість збільшується на 38,0 % - 52,4 %.

Таким чином, значення твердості наплавленого металу можна збільшити приблизно на 3,0 % - 52,0 % на певних технологічних режимах.

Дослідження формування твердості ЗТВ

Аналізуючи контурні графіки твердості металу ЗТВ (додаток В), можна відмітити чотири основних типи впливу параметрів коливань на формування максимального значення твердості металу ЗТВ:

- за $I_n = 100,0$ А та $V_n = 0,0039$ м/с, $V_n = 0,005$ м/с, $V_n = 0,0061$ м/с та $V_n = 0,0072$ м/с; за $I_n = 125,0$ А, $V_n = 0,0039$ м/с, $V_n = 0,005$ м/с, $V_n = 0,0061$ м/с та $V_n = 0,0072$ м/с; за $I_n = 150,0$ А та за будь якої швидкості; за $I_n = 175,0$ А та $200,0$ А, $V_n = 0,005$ м/с, $V_n = 0,0061$ м/с та $V_n = 0,0072$ м/с максимальне значення твердості формуються за діапазоном частот у 2,5 Гц - 3,0 Гц, та за 4,0 Гц - 4,5 Гц за діапазоном амплітуд у 0,003 м - 0,007 м (так само, як і при формуванні максимального значення твердості наплавленого металу, максимальне значення твердості металу ЗТВ або близьке до нього можливо

- отримати у двох частотних діапазонах на одному технологічному режимі. Із зазначених це є режими: $I_n=100,0$ А, $V_n = 0,0039$ м/с; $I_n=150,0$ А, $V_n = 0,005$ м/с та $V_n = 0,0061$ м/с);
- за $I_n = 100,0$ А та $V_n = 0,0028$ м/с максимальне значення твердості металу ЗТВ формується за частоти у 3,0 Гц та за амплітуди у 0,007 м;
 - за $I_n = 175,0$ А та 200,0 А, $V_n = 0,0028$ м/с, $V_n = 0,0039$ м/с максимальне значення твердості металу ЗТВ спостерігається за частотним діапазоном у 3,5 Гц - 4,5 Гц та за амплітудним у 0,004 м - 0,006 м;
 - за $I_n = 125,0$ А, $V_n = 0,0028$ м/с максимальне значення твердості металу ЗТВ формується за зворотною залежністю між частотою та амплітудою – зі збільшенням частоти від 3,0 Гц до 4,5 Гц амплітуда повинна зменшуватись від 0,005 м - 0,006 м до 0,003 м - 0,004 м.

Таким чином, так само, як і при формуванні максимального значення твердості наплавленого металу, максимальні значення твердості металу ЗТВ формуються найчастіше за діапазонами частот у 2,5 Гц - 3,0 Гц та за 4,0 Гц - 4,5 Гц. Співвідношення сили струму та швидкості наплавлення визначає значення амплітуди та можливість формування максимального значення твердості на двох частотних діапазонах на одному технологічному режимі та інших частотних діапазонах. Найефективнішими частотними діапазонами є 2,5 Гц - 3,0 Гц та 4,0 Гц - 4,5 Гц, а за амплітудним у 0,003 м - 0,006 м.

Оцінки збільшення значення твердості ЗТВ відносно даних вимірів (табл. 4.6) максимального значення твердості без впливу коливань будуть наступними: за $I_n = 100,0$ А, $V_n = 0,0028$ м/с – $H_{ЗТВmax} = 1635,0$ МПа; максимальне значення з коливаннями на даному технологічному режимі досягається за частоти у 3,0 Гц, амплітуди у 0,007 м та лежить у межах $H_{ЗТВmax}^{КОЛ} = 2600,0$ МПа - 2700,0 МПа, тобто твердість збільшується на 59,0 % - 65,0 %. $I_n = 125,0$ А, $V_n = 0,0039$ м/с – $H_{ЗТВmax} = 1750,0$ МПа без коливань; максимальне значення з коливаннями досягається за частоти у 4,5 Гц, амплітуд у 0,003 м - 0,004 м та лежить за інтервалом $H_{ЗТВmax}^{КОЛ} = 2400,0$ МПа - 2500,0 МПа, твердість збільшується на 37,0 % - 42,8 %. При

$I_n = 150,0$ А, $V_n = 0,005$ м/с – $H_{ЗТВmax} = 2040,0$ МПа без коливань; максимальне значення з коливаннями досягається за частоти у 4,5 Гц, амплітуд у 0,003 м - 0,004 м та лежить за інтервалом у $H_{ЗТВmax}^{КОЛ} = 2600,0$ МПа - 2700,0 МПа, тобто твердість збільшується на 27,5 % - 32,4 %. За $I_n = 175,0$ А, $V_n = 0,0061$ м/с – $H_{ЗТВmax} = 2110,0$ МПа без коливань; максимальне значення з коливаннями досягається за частот у діапазоні 2,5 Гц - 3,0 Гц, амплітуд 0,003 м - 0,006 м та знаходиться за інтервалом $H_{ЗТВmax}^{КОЛ} = 3200,0$ МПа - 3400,0 МПа, тобто твердість збільшується на 51,7 % - 61,0 %. За $I_n = 200,0$ А, $V_n = 0,0072$ м/с – $H_{ЗТВmax} = 1840,0$ МПа без коливань; максимальне значення з коливаннями досягається за частоти у 2,5 Гц, амплітуду 0,004 м - 0,005 м та знаходиться за діапазоном $H_{ЗТВmax}^{КОЛ} = 4100,0$ МПа - 4500,0 МПа, тобто твердість збільшується від 1,22 рази до 1,44 рази.

Таким чином, значення твердості ЗТВ можна збільшити приблизно на 27,0 % - 144,0 % завдяки коливанням зварювальної ванни на певних технологічних режимах.

Дані щодо граничних значень твердості наплавленого металу, отриманого економнолегованим дротом взагалі і дротом типу Св-08Г2С зокрема, різняться у літературі: так Л.С. Лившиц і А.Н. Хакимов (рос.) наводять значення твердості наплавленого металу і металу ЗТВ з низьковуглецевих та низьколегованих сталей, що не перевищує 2000,0 МПа [110]; И.А. Рябцев і И.К. Сенченков (рос.) наводять значення 20,0 HRC - 45,0 HRC (2128,0 МПа - 4481,0 МПа) [111]. При наплавленні дротом типу Св-08Г2С А.Г. Потапьевский (рос.) [68] та В.Я. Кононенко (рос.) [76] вказують діапазон твердості наплавленого металу в межах 220,0 HB - 250,0 HB (2147,0 МПа - 2451,0 МПа). Певна розбіжність у значеннях обумовлює проведення порівняльного аналізу твердості наплавленого металу та металу ЗТВ, що отримані при зварюванні (наплавленні) дротом типу ER70S-6 на основний метал різного ступеню легування:

- при ручному зварюванні неплавким катодом труб із сталі ASTM A106 Gr. B (C: 0,19 %; Si: 0,20 %; Mn: 0,9 6%; P: 0,016 %; S: 0,006 %; Fe: інше) дротом

марки *AWS ER 70 S3* (*C*: 0,18 %; *Si*: 0,18 %; *Mn*: 0,95 %; *P*: 0,09 %; *S*: 0,04 %; *Fe*: інше) *C.C. Silva* та ін. отримали зразки, які мали мікротвердість наплавленого металу та металу ЗТВ, що не перевищувала 240,0 *HV* (2354,0 МПа) [112];

- при однопрохідному роботизованому наплавленні у середовищі *Ar* (82,0 %) + *CO₂* (18,0 %) з використанням технології *CMT* дротом марки *ER70S-6* на поверхню зі сталі марки *EN36* (*C*: ≤ 0,18 %; *Si*: ≤ 0,50 %; *Mn*: 0,9 % - 1,6 %; *Cu*: ≤ 0,35 %; *Cr*: ≤ 0,20 %; *Ni*: ≤ 0,40 %; *Nb*: від 0,02 % до 0,04 %; *V*: від 0,05 % - 0,10 %; *Ti*: ≤ 0,2 %; *Mo*: ≤ 0,08 %; *P*: ≤ 0,025 %; *S*: ≤ 0,025 %; *Fe*: інше) *S. Liu* та ін. були отримані зразки, що мали максимальну твердість наплавленого металу валика на рівні 325,0 *HV* (3187,0 МПа), металу ЗТВ – близько 200,0 *HV* (1962,0 МПа) [113];
- при механізованому зварюванні у захисному середовищі *Ar* (98,0 %)+*O₂* (2,0 %) плоских пластин дротом *ER70S-6*, одна з яких виготовлена з двофазної сталі марки *DPC340Y590T* (*C*: 0,104 %; *Si*: ≤ 0,422%; *Mn*: 2,0 %; *Cu*: 0,022 %; *Cr*: 0,02 %; *Ni*: 0,02 %; *Al*: 0,79 %; *Co*: 0,0038 %; *Ti*: ≤ 0,2 %; *Mo*: 0,0013 %; *P*: 0,017 %; *S*: 0,013 %; *Fe*: інше), друга – з низьковуглецевої марки *JSC270C* (*C*: 0,035 %; *Si*: < 0,011 %; *Mn*: 0,087 %; *Cu*: 0,019 %; *Cr*: 0,025 %; *Ni*: 0,018 %; *Al*: 0,039 %; *Co*: < 0,004 %; *Mo*: 0,015 %; *P*: 0,013 %; *S*: 0,0065 %; *Fe*: інше), *C.M. Gótorra* та ін. було отримано зварне з'єднання з максимальною мікротвердістю наплавленого металу близько 350,0 *HV* (3432,0 МПа), металу ЗТВ: у двофазної сталі – близько 400,0 *HV* (3923,0 МПа), у низьковуглецевій – не більше 150,0 *HV* (1471,0 МПа) [114].

При роботизованому наплавленні у середовищі *Ar* (98,0 %) + *O₂* (2,0 %) із застосуванням технології *3D* друку дротом *ER70S-6* *T. Ron* та ін. отримали циліндричні наскрізні зразки з твердістю наплавленого металу 192,4 *HV* (1887,0 МПа) [115].

Порівняння виявило, що даний тип наплавлення з використанням коливань зварювальної ванни забезпечує досить високе значення твердості для означеного типу дроту та основного металу (зразок 10 (табл. 4.6)): на рівні від 2710,0 МПа до 2790,0 МПа – значення твердості наплавленого металу, що може бути збільшене до рівня в межах від 2791,0 МПа до 4241,0 МПа у відповідності з моделлю (4.7); на рівні від 3170,0 МПа до 3200,0 МПа – значення твердості металу ЗТВ, що може бути збільшене до рівня в межах від 4026,0 МПа до 7808,0 МПа у відповідності з моделлю (4.8). Дані результати свідчать, що граничні значення твердості, зазначенні у роботі [111], є більш достовірними для даної марки зварювального дроту, основного металу і умов наплавлення.

Граничні значення твердості металу ЗТВ, що рекомендовані для запобігання утворення холодних тріщин, обираються за діапазоном від 200,0 *HV* до 350,0 *HV* (1961,0 МПа - 3430,0 МПа) [92].

Вплив основних факторів на висоти валику

З аналізу контурних графіків формування висоти валику b (додаток Г) витікає, що мінімальне її значення формується за частотних діапазонів у 2,5 Гц - 3,0 Гц, та у 4,0 Гц - 4,5 Гц при будь-якій силі струму та швидкості наплавлення. Але, так само, як і при формуванні максимального значення твердості наплавленого металу та металу ЗТВ, мінімальне значення висоти валику b або близьке до нього можливо отримати у двох частотних діапазонах на одному технологічному режимі. Цими режимами є: $I_n = 125,0$ А, $V_n = 0,0028$ м/с; $I_n = 150,0$ А, $V_n = 0,0039$ м/с, $V_n = 0,005$ м/с та $V_n = 0,0072$ м/с; $I_n = 175,0$ А, $V_n = 0,0028$ м/с, $V_n = 0,0039$ м/с; $I_n = 200,0$ А, $V_n = 0,0072$ м/с. Тобто, мінімальне значення висоти валику формуються завжди за діапазонів частот у 2,5 Гц - 3,0 Гц та 4,0 Гц - 4,5 Гц, а співвідношення сили струму та швидкості наплавлення визначає значення амплітуди та можливість формування мінімального значення висоти валику на двох частотних діапазонах на одному технологічному режимі. Найефективнішим амплітудним діапазоном є 0,004 м - 0,006 м.

Порівняльні оцінки величин розміру висоти валику, який отриманий без впливу коливань (табл. 4.5), відносно найменшого розміру висоти валику, що формуються за аналогічним технологічним режимом, але з використанням коливань зварювальної ванни, будуть наступними: $I_n = 100,0$ А, $V_n = 0,0028$ м/с – $b_{min} = 4,18$ мм без коливань; мінімальне значення з коливаннями на даному технологічному режимі досягається за частоти у 2,5 Гц і амплітуди у 0,007 м та не перевищує $b_{min}^{kol} = 0,7$ мм, тобто розмір висоти валику завдяки коливанням зменшився щонайменше у 6 разів; $I_n = 125,0$ А, $V_n = 0,0039$ м/с – $b_{min} = 2,8$ мм без коливань; мінімальне значення з коливаннями на даному технологічному режимі – за частоти у 2,5 Гц, амплітуди у 0,005 м - 0,007 м становить $b_{min}^{kol} = 2,3$ мм, тобто розмір висоти валику завдяки коливанням зменшився у 1,2 рази; $I_n = 150,0$ А, $V_n = 0,005$ м/с – $b_{min} = 5,3$ мм без коливань; мінімальне значення з коливаннями на даному технологічному режимі – за частоти у 2,5 Гц, за амплітуди у 0,004 м - 0,006 м становить $b_{min}^{kol} = 2,7$ мм, тобто розмір висоти валику завдяки коливанням зменшився у 2 рази; $I_n = 175,0$ А, $V_n = 0,0061$ м/с – $b_{min} = 5,2$ мм без коливань; мінімальне значення з коливаннями на даному технологічному режимі – за частоти у 2,5 Гц, за амплітуди у 0,004 м - 0,006 м становить $b_{min}^{kol} = 2,0$ мм, тобто розмір висоти валику завдяки коливанням зменшився у 2,6 рази; $I_n = 200,0$ А, $V_n = 0,0072$ м/с – $b_{min} = 6,4$ мм без коливань; мінімальне значення з коливаннями на даному технологічному режимі – за частоти у 2,5 Гц, за амплітуди у 0,004 м - 0,006 м становить $b_{min}^{kol} = 1,0$ мм, тобто розмір висоти валику завдяки коливанням зменшився у 6,4 рази.

Таким чином, значення висоти наплавленого валику можна зменшити приблизно від 1,2 рази до 6,4 рази, використовуючи гармонійні поперечні коливання зварювальної ванни.

Вплив основних факторів на ширину валику

У даному випадку коливань зварювальної ванни на технологічних режимах, за якими здійснювалось наплавлення, ширина збільшується на (табл.4.5): 82,0 % (1 у

порівнянні з 1*), 60,0 % (7 у порівнянні з 7*), 33,0 % (13 у порівнянні з 13*), 60,0 % (19 у порівнянні з 19*) та 44,8% (25 у порівнянні з 25*), тобто збільшення ширини наплавленого валику завдяки коливанням можливе від 1,3 рази до 1,8 рази, що обумовлює побудову відповідної моделі.

Розрахунок ширини наплавленого валика W , що формується в умовах гармонійних поперечних коливань зварювальної ванни завдяки впливу зовнішньої сили $F(t) = F_0 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot \nu \cdot t + \varphi_0)$, здійснювався за вирішенням рівняння вимушених коливань гармонійного осцилятора [116]:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2 \cdot \gamma \cdot \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 \cdot x = \frac{F_0}{m} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot \nu \cdot t + \varphi_0), \quad (4.11)$$

де x – поточна координата центру мас розплаву зварювальної ванни, м;

$2 \cdot \gamma = \frac{\beta}{\rho_{pm} \cdot h^2}$ – коефіцієнт що характеризує силу в'язкого тертя;

$\omega_0^2 = \frac{g}{l_k}$ – частота власних коливань розплаву;

β – коефіцієнт в'язкості металу розплаву, Па·с;

ρ_{pm} – густина рідкої сталі, г/см³;

F_0 – амплітуда примушуючої сили, Н;

φ_0 – початкова фаза перед виходом на стаціонарний режим роботи від початкового стану. В даному дослідженні прийнято $\varphi_0 = -\frac{\pi}{2}$.

Рішенням рівняння (4.11) є вираз:

$$\begin{aligned}
x(t) &= \frac{F_0}{m \cdot \sqrt{(\omega_0^2 - (2 \cdot \pi \cdot v)^2)^2 + 4 \cdot \gamma^2 \cdot (2 \cdot \pi \cdot v)^2}} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot v \cdot t + \theta + \varphi_0) = \\
&= \frac{F_0}{m \cdot \sqrt{(\omega_0^2 - (2 \cdot \pi \cdot v)^2)^2 + 4 \cdot \gamma^2 \cdot (2 \cdot \pi \cdot v)^2}} \cdot \cos\left(2 \cdot \pi \cdot v \cdot t + \theta - \frac{\pi}{2}\right) = \\
&= \frac{F_0}{m \cdot \sqrt{(\omega_0^2 - (2 \cdot \pi \cdot v)^2)^2 + 4 \cdot \gamma^2 \cdot (2 \cdot \pi \cdot v)^2}} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot v \cdot t + \theta),
\end{aligned} \tag{4.12}$$

де $\theta = \arctg\left(\frac{2 \cdot \gamma \cdot (2 \cdot \pi \cdot v)}{\omega_0^2 - (2 \cdot \pi \cdot v)^2}\right)$ – кут між вектором примушуючої сили $F(t)$ та напрямом

зміни координати $x(t)$. Примушуюча сила $F(t)$ зв'язана з крутним моментом на валу крокового двигуна M_0 , Н·м завдяки виразу:

$$F(t) = \frac{M_0}{l_k} \cdot \cos\left(2 \cdot \pi \cdot v \cdot t - \frac{\pi}{2}\right) = \frac{M_0}{l_k} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot v \cdot t).$$

Крутний момент M_0 є складовою моменту M_d на валу крокового двигуна за півперіод, що визначається за виразом (2.4') (пункт 2.3 розділ 2). Тоді за час півперіоду $t = \frac{k}{2 \cdot v}$, де k – будь яке натуральне число, величина координати

$x\left(\frac{k}{2 \cdot v}\right)$ буде максимальною та дорівнюватиме W – ширині наплавленого валику,

яка буде визначатися за виразом, м:

$$W = \left| \frac{4 \cdot A \cdot l_k \cdot \pi^2 \cdot v^2 \cdot m - 3 \cdot \mu \cdot m \cdot g \cdot D}{m \cdot l_k \cdot \sqrt{(\omega_0^2 - (2 \cdot \pi \cdot v)^2)^2 + 4 \cdot \gamma^2 \cdot (2 \cdot \pi \cdot v)^2}} \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot k}{2} + \theta\right) \right|. \tag{4.13}$$

За виразами (3.12), (3.13) розділу 3 та (4.13) були розраховані значення ширини валиків для різних режимів наплавлення та коливань зварювальної ванни за допомогою пакету *Mathcad*, які наведені у таблиці 4.7.

Слід зазначити, що значення l_k (рис. 2.12, розділ 2) для кожного значення частоти та амплітуди обиралися експериментальним шляхом, а виставлялася завдяки регулювання висоти диску з деталлю, який обертається по різьбі навколо

своєї осі. Так як хід різьби від 10,0 до 50,0 мм, значення $l_k > 50,0$ мм встановлювалися за допомогою технологічної підкладки.

Значення інших необхідних параметрів, які є незмінними при розрахунку, були такими, як і при розрахунку ширини валика l , що визначалась при визначенні швидкості наплавлення за умови суцільності валику (розділ 3).

Відносна похибка вираховувалася за виразом:

$$\Delta = \left| \frac{W_{розр} - W_{вим}}{W_{вим}} \right| \cdot 100\%, \quad (4.14)$$

де $W_{роз}$ – значення ширини, розраховане за виразом (4.13), м; $W_{вим}$ – виміряне значення ширини (табл. 4.7), м.

Загальна середня відносна похибка даної моделі становить приблизно 18,0 %.

Для оцінки ступеню впливу технологічних факторів використана методика Протодьяконова [103], сутність якої полягає у визначенні середніх значень відгуку – ширини валика для кожного значення відповідного головного фактору. За визначеними (Додаток Д, табл. 1) середніми вимірними та середніми розрахованими за аналітичною моделлю (4.13) (табл. 4.7) значеннями, побудовані графіки залежності ширини наплавленого валика W від зварювального струму I_n , швидкості наплавлення V_n , частоти ν та амплітуди A примусових поперечних коливань зварювальної ванни (рис. 4.3).

З огляду на взаємозв'язок кута нахилу функції відгуку зі значимістю впливу технологічного фактору встановлено, що найбільш суттєвими факторами впливу на ширину наплавленого валика є амплітуда коливань A .

Додаткові експерименти, описані в опублікованій автором роботі [117], показали, що за діапазонів параметрів частоти від 2,5 Гц до 4,5 Гц та амплітуди від 0,003 м до 0,007 м примусових поперечних коливань зварювальної ванни розглянутого типу вплив сил інерції на розтікання розплавленого металу зварювальної ванни та, відповідно, ширини валика є незначним. Він проявляється при частоті $\nu > 10,0$ Гц.

Таблиця 4.7 – Розраховані за виразом (4.13) та виміряні значення ширин валиків з наведеною відносною похибкою

Сила струму наплавлення I_n , А	Швидкість наплавлення V_n , м/с	Частота коливань ν , Гц / відстань від осі коливань до центра мас розплаву l_k , мм		Амплітуда коливань A , мм	Ширина валика розрахована $W_{роз}$, мм	Ширина валика виміряна $W_{вим}$, мм	Відносна похибка Δ , %
150,0	0,005	2,5	70,0	7,0	16,0	15,8	1,3
125,0	0,0072		69,0	6,0	14,0	12,4	13,0
200,0	0,0028		68,0	5,0	12,0	15,7	23,6
100,0	0,0061		67,0	4,0	9,0	10,96	18,0
175,0	0,0039		66,5	3,0	7,0	11,7	40,2
125,0	0,0039	3	45,0	7,0	18,0	17,2	4,7
200,0	0,005		44,0	6,0	15,0	15,8	5,1
100,0	0,0072		43,0	5,0	13,0	10,3	26,0
175,0	0,0028		41,5	4,0	11,0	15,4	28,6
150,0	0,0061		41,0	3,0	8,0	10,8	26,0
200,0	0,0061	3,5	33,0	7,0	18,0	19,0	5,3
100,0	0,0039		32,0	6,0	16,0	13,6	17,6
175,0	0,005		31,0	5,0	14,0	14,0	0
150,0	0,0072		30,5	4,0	11,0	13,8	20,0
125,0	0,0028		30,0	3,0	9,0	13,2	31,8
100,0	0,0028	4	24,0	7,0	19,0	18,8	1,1
175,0	0,0061		23,0	6,0	18,0	14,1	27,7
150,0	0,0039		22,0	5,0	16,0	14,3	12,0
125,0	0,005		21,5	4,0	13,0	11,8	10,2
200,0	0,0072		21,0	3,0	10,0	11,3	11,5
175,0	0,0072	4,5	20,5	7,0	17,0	9,0	88,9
150,0	0,0028		19,0	6,0	16,0	17,9	10,6
125,0	0,0061		18,0	5,0	15,0	18,0	16,7
200,0	0,0039		17,5	4,0	13,0	13,8	5,6
100,0	0,005		17,0	3,0	10,0	9,6	4,2

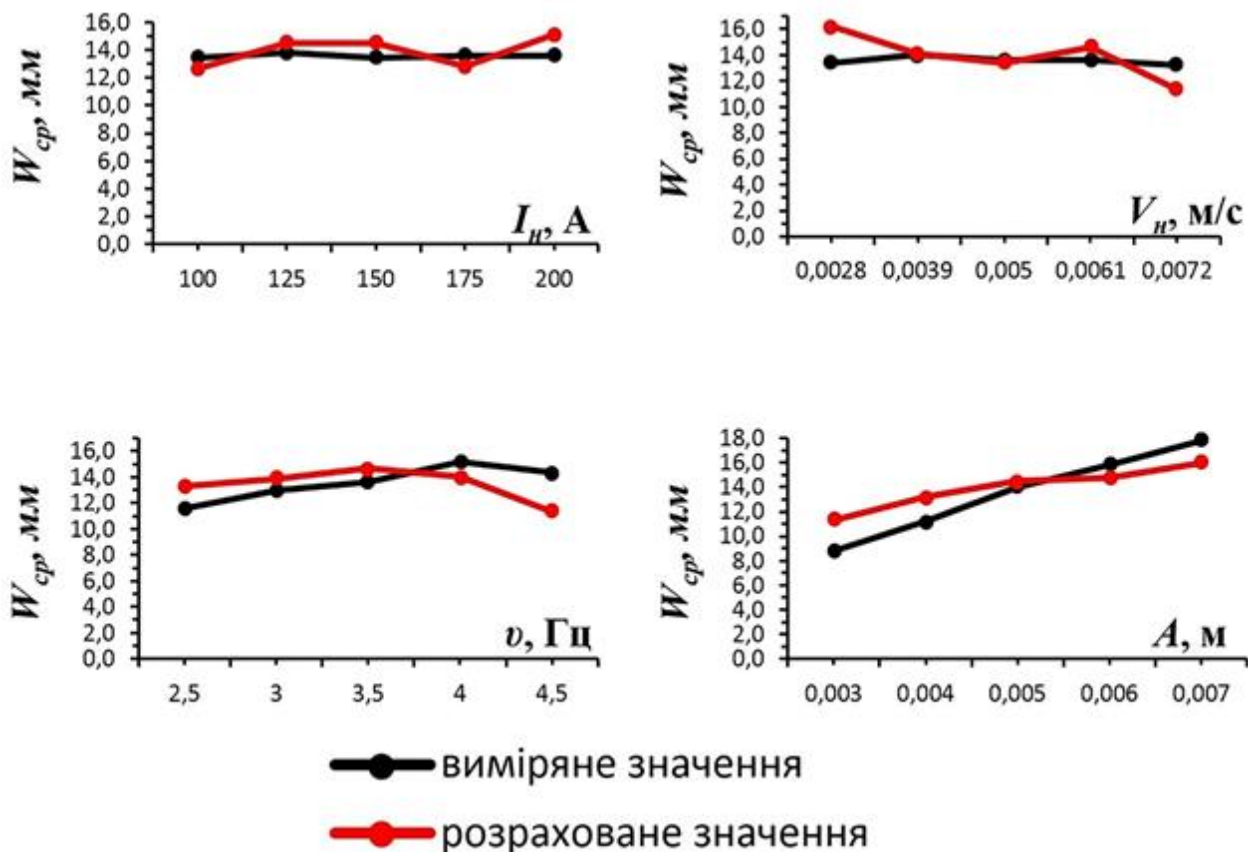


Рисунок 4.3 – Графіки середніх значень ширини наплавленого валику виміряні та розраховані, що визначалися за методом Протод'яконова [103]

Дослідження впливу коливань на глибину проплавлення

Загальний вигляд поперечного перетину досліджуваних валиків наведено на рисунку 4.4.

Глибина проплавлення визначалась для валиків, що отримані на окремих технологічних режимах як з коливальним впливом, так і без нього (табл. 4.8).

З аналізу встановлено, що глибина проплавлення валиків, що отримані без коливально впливу знаходиться в межах від 2,0 мм до 3,0 мм, а валиків, що отримані під коливальним впливом – від 1,0 мм до 3,0 мм.

Найбільше зниження глибини проплавлення під дією коливань на рівні від 1,0 мм до 1,5 мм фіксується для режимів наплавлення з силою струму за діапазоном від 100,0 А до 150,0 А. З подальшим збільшенням сили струму наплавлення вплив коливань на величину глибини проплавлення нівелюється (рис. 4.5).

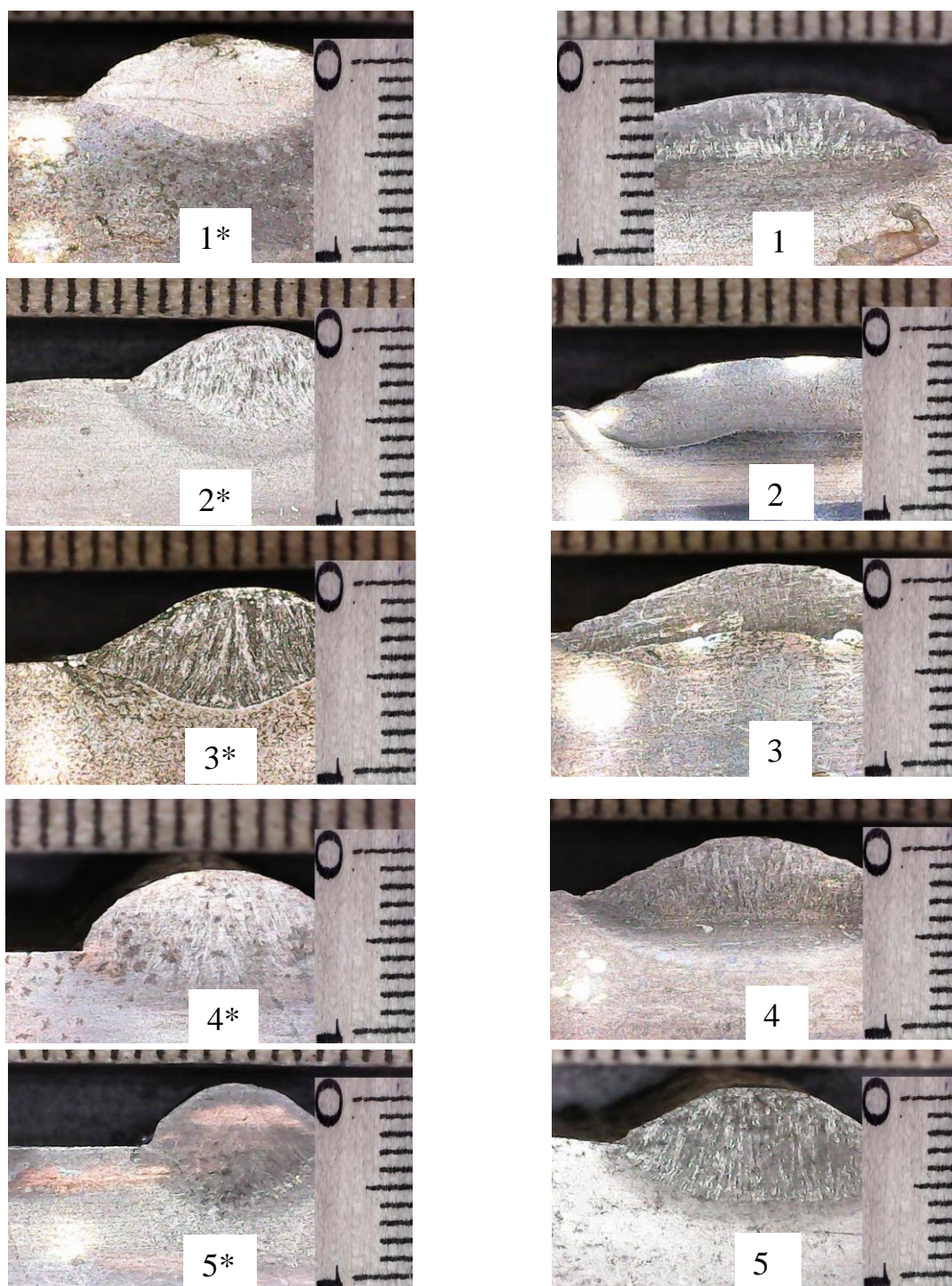


Рисунок 4.4 – Зовнішній вигляд поперечних перетинів наплавлених валиків, отриманих як під впливом коливань 1 - 5, так і без цього впливу 1* - 5* у відповідності з таблицею 4.8

Таблиця 4.8 – Технологічні та коливальні режими експериментів наплавлення щодо визначення глибини проплавлення

Номер експерименту	Сила струму наплавлення I_n , А	Швидкість наплавлення V_n , м/с	Частота коливань ν , Гц	Амплітуда коливань A , м
1*	100,0	0,0028	-	-
1			4,0	0,007
2*	125,0	0,0039	-	-
2			3,0	0,007
3*	150,0	0,005	-	-
3			2,5	0,007
4*	175,0	0,0061	-	-
4			4,0	0,006
5*	200,0	0,0072	-	-
5			4,0	0,003

Глибина проплавлення без та під впливом коливань, мм

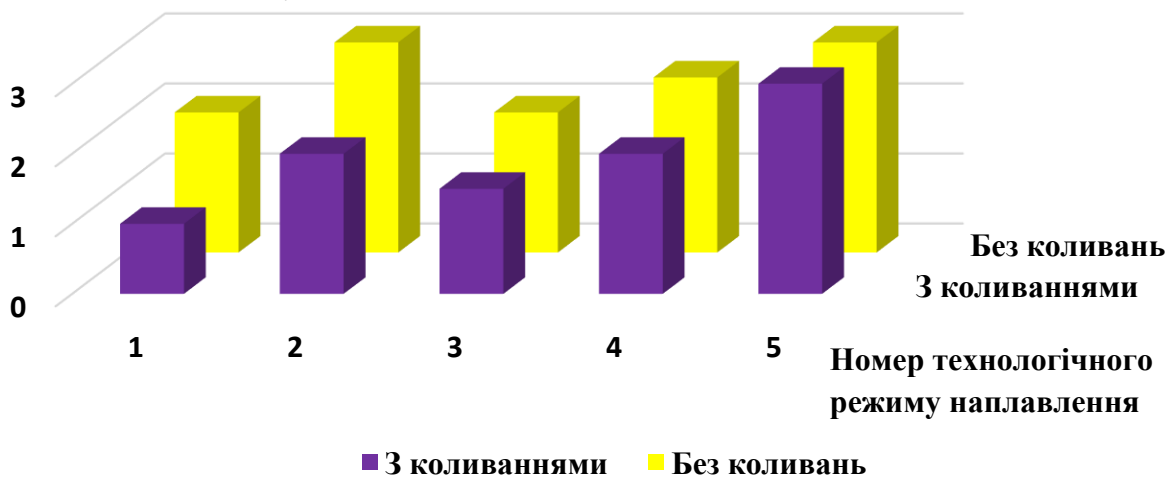


Рисунок 4.5 – Порівняльна діаграма щодо визначення глибини проплавлення за технологічними режимами наплавлення таблиці 4,8

4.4 Визначення оптимального режиму наплавлення з коливаннями зварювальної ванни

Визначення оптимального режиму наплавлення з використанням гармонійних коливань зварювальної ванни буде виконуватися за критеріями: мінімальне значення струму наплавлення, максимальна ширина наплавленого валику, тобто у діапазоні амплітуд від 0,006 м до 0,007 м; низьке значення висоти наплавленого валику, тобто за частот у діапазонах від 2,5 Гц до 3,0 Гц та від 4,0 Гц до 4,5 Гц; враховуючи особливості формування зварних швів та наплавлених валиків (рис. 4.6 [118]), забезпечення різниці значень твердості наплавленого металу (зона 2) і твердості металу у ЗТВ (зона 3) якомога меншого значення.

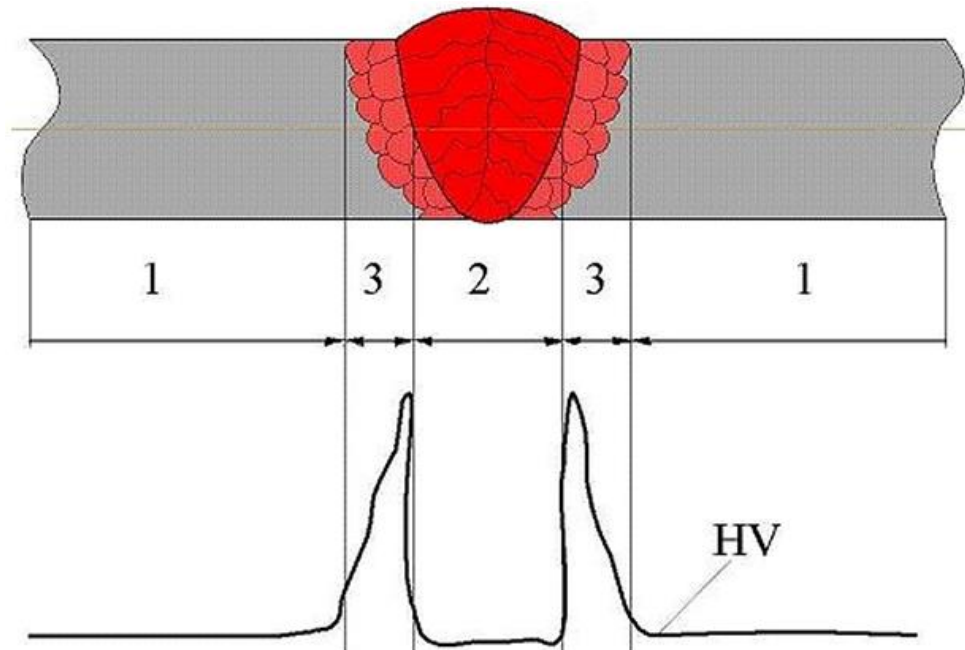


Рисунок 4.6 – Орієнтовна схема розподілення твердості (HV) в різних зонах зварного з'єднання: 1 – основний метал, 2 – наплавлений метал, 3 – метал ЗТВ [118]

За даними таблиці Д.2 (додаток Д) можна рекомендувати такий режим наплавлення: $I_n = 100,0$ А, $V_n = 0,0072$ м/с, $\nu = 2,5$ Гц при $A = 0,007$ м, що дасть змогу отримати наплавлений валик з твердістю наплавленого металу до 2800,0 МПа з мінімальною різницею у значеннях твердості наплавленого металу та металу ЗТВ, з шириною валику близько 16,0 мм у відповідності до (4.13) та товщиною, значення

якої має бути у діапазоні від 2,5 мм до 2,9 мм (додаток Г, рис. Г.1). За даним режиму було проведено наплавлення та отримано валик з такими фактичними (вимірними) значеннями твердості та геометричних розмірів: твердість наплавленого металу – 2600,0 МПа; твердість ЗТВ – 2800,0 МПа; ширина валику – приблизно 18,3 мм, висота – приблизно 3,0 мм. Звідси видно, що розрахункові дані за статистичними регресійними моделями та за аналітичною моделлю (4.13) корелюють з експериментальними у заданих межах. Слід зазначити, що даний режим наплавлення для суцільного дроту типу Св-08Г2С діаметром 1,2 мм має значення сили струму ($I_n = 100,0$ А) та швидкості наплавлення ($V_n = 0,0072$ м/с), які мало відрізняються від відповідних значень режимів наплавлення, що здійснюється без впливу коливань звичайним чином: $I_n = 100,0$ А - 140,0 А, $V_n = 30,0$ м/год - 35,0 м/год (0,0083 м/с - 0,0097 м/с) з отриманням твердості наплавленого металу у межах від 220,0 НВ до 250,0 НВ (2147,0 МПа - 2451,0 МПа) [68]. Тобто, застосування наплавлення з коливаннями за рекомендованим режимом модифікує наплавлений метал та підвищує його твердість приблизно від 6,0 % до 21,0 %.

Якщо ж обмежитися тільки критеріями твердості, тобто без урахування геометричних показників, то оптимальний режим наплавлення буде іншим: $I_n = 125,0$ А, $V_n = 0,0039$ м/с, $\nu = 3,0$ Гц при $A = 0,007$ м (додаток Б, рис. Б.2; додаток В, рис. В.2), при якому твердість наплавленого металу буде близька до твердості металу ЗТВ на рівні 2200,0 МПа, що дає змогу збільшити твердість наплавленого металу та металу ЗТВ від 28,0 % до 36,6 % та від 25,7 % до 33,3 % відповідно, у порівнянні з наплавлення без коливань на аналогічному технологічному режимі (режим 7*, табл. 4.6).

4.5 Наплавлення на оптимальному режимі наплавлення з коливаннями зварювальної ванни зварювальним дротом марки Нп-30ХГСА

За визначеними діапазонами оптимальних режимів наплавлення з використанням гармонійних коливань зварювальної ванни у діапазоні амплітуд від

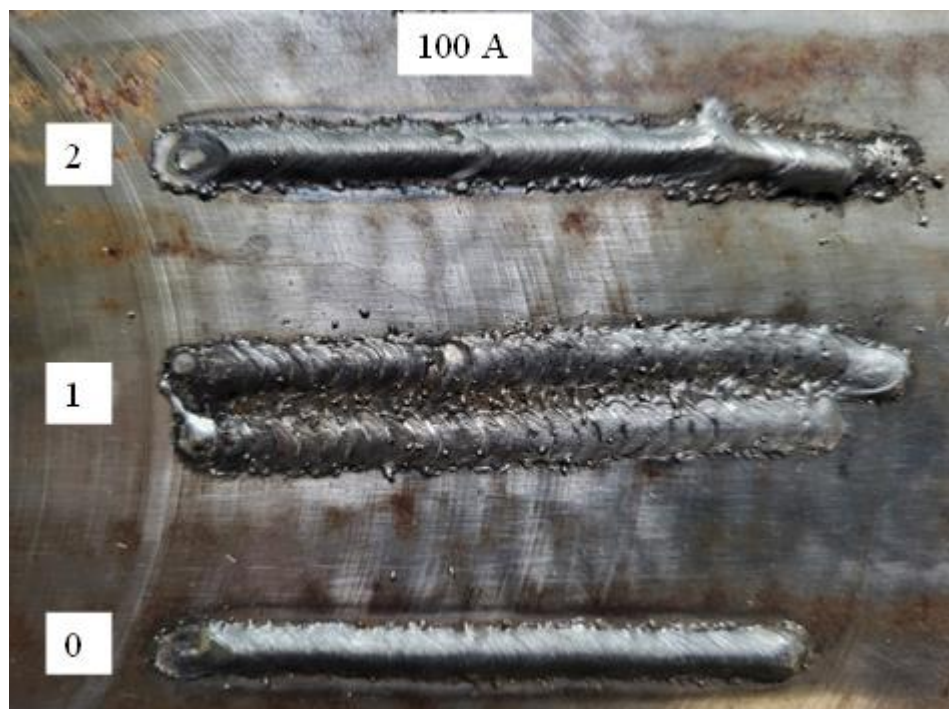
0,006 м до 0,007 м, частот – від 2,5 Гц до 3,0 Гц та від 4,0 Гц до 4,5 Гц, струмі наплавлення у діапазоні від 100,0 А до 150,0 А, швидкість наплавлення у діапазоні від 0,0061 м/с до 0,0072 м/с. Режимми наплавлення на зразки із СтЗсп зварювальним дротом означеної марки діаметром 1,2 мм були наступними: за $I_n = 100,0$ А: **0.** $V_n = 0,0061$ м/с; **1.** $V_n = 0,0061$ м/с, $\nu = 2,5$ Гц, $A = 0,007$ м; **2.** $V_n = 0,0062$ м/с, $\nu = 4,5$ Гц, $A = 0,003$ м. За $I_n = 125,0$ А: **0.** $V_n = 0,0072$ м/с; **1.** $V_n = 0,0072$ м/с, $\nu = 2,5$ Гц, $A = 0,007$ м; **2.** $V_n = 0,0072$ м/с, $\nu = 4,5$ Гц, $A = 0,003$ м.

Мікротвердість визначалась за методом Віккерса при навантаженні на інденторі 20 г. Середні значення мікротвердості вказані у таблиці 4.9.

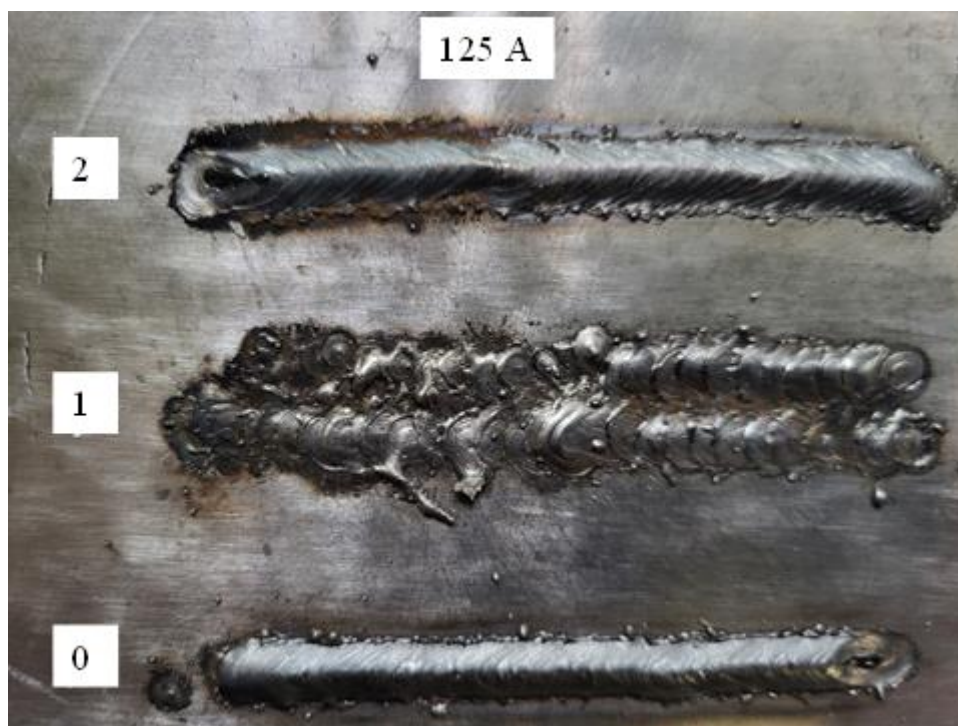
Таблиця 4.9 – Середні значення мікротвердості наплавленого металу та металу ЗТВ

Область вимірювання	Середнє значення мікротвердості, $\times 10^6$ Па	Номер зразку					
		Сила струму наплавлення 100,0 А			Сила струму наплавлення 125,0 А		
		0	1	2	0	1	2
Наплавлений метал	верхня частина валику	3650 3380	4480, 4650, 4730, 4470	3890 3900	4680 4370	4260, 4830, 4580, 4510	4360, 4130
	центральна частина валику	3500 3670	4240, 4150, 4100, 4290	3660 3600	4630 4730	4420, 4350, 4820, 4700	4070 4110
	нижня частина валику	3630 3540	4510, 4330, 4300, 4560	3680 4000	4360 4560	4650, 4550, 4660 4540	4230, 4210
	Середнє значення мікротвердості, $\times 10^6$ Па	3562	4401	3788	4555	4572,5	4185
Метал ЗТВ		2970 3170	3070, 2500, 3550, 3480	3270 2350	3610 3900	3990, 3270, 3040 3820	3310 3790
Середнє значення мікротвердості, $\times 10^6$ Па		3070	3150	2810	3755	3530	3550

Загальний вигляд наплавлених валиків зображено на рисунку 4.7.



а



б

Рисунок 4.7 – Загальний вигляд наплавлених валиків: а – за струмом наплавлення у $I_n = 100,0$ А, б – за струмом наплавлення у $I_n = 125,0$ А

З аналізу даних таблиці 4.9 видно, що ефективність коливань даного типу спостерігається за струмом наплавлення у $100,0$ А та за швидкості наплавлення у $0,0061$ м/с. У порівнянні із зразком, що отриманий без впливу коливань на режимі 0 мікротвердість напавленого металу зростає на $23,55$ % на режимі 1 і на $6,3$ % на

режимі 2. Режими наплавлення з силою струму наплавлення у 125,0 А (режими 1, 2) не сприяють підвищенню мікротвердості у порівнянні із наплавленням без коливального впливу (режим 0), що вказує на його неефективність для даного типу зварювального дроту.

4.6 Висновки до розділу 4

1. Розроблений план експериментів за методом «латинського квадрату» для серії з 25 експериментів. Обґрунтовані та обрані наступні незалежні фактори щодо побудови поліномів за методикою регресійного аналізу: сила струму наплавлення I_n , швидкість наплавлення V_n , амплітуда коливань деталі A , що наплавляється, частота цих коливань ν .
2. Підготовлені зразки зі СтЗсп були наплавлені суцільним дротом типу Св-08Г2С у середовищі вуглекислого газу за розробленим планом. Якість формування напавленого валика визначалась за якісними критеріями: “незадовільно”, “задовільно” та “добре”: “добре” – 13; “задовільно” – 10; “незадовільно” – 1.
3. У якості досліджуваних величин обрано:
 - величина кристаліту δ – показник диспергування мікроструктури напавленого металу;
 - величина твердості H та $H_{ЗТВ}$ – показник міцності напавленого металу та металу ЗТВ відповідно;
 - величина висоти b та ширини W напавленого валика – показник геометричних характеристик;
 Виміри вищезначених величин здійснювались у напавленому металі та ЗТВ у верхній, середній та нижній частині валика.
4. Регресійні моделі отримані за допомогою метода найменших квадратів для значень величини кристаліту δ , твердості H та $H_{ЗТВ}$, висоти b напавленого валика. Адекватність моделей оцінювалась у відповідності методики

регресійного аналізу. Всі отримані моделі є адекватними та мають ступені відповідності до істинної залежності у межах від 85,0 % до 94,0 %. Для визначення ширини W наплавленого валика отримана аналітична модель, як рішення рівняння математичного маятника з достовірністю у 85,0 %.

5. За отриманими регресійними моделями отримані контурні графіки залежності $\delta(\nu, A)$, $H(\nu, A)$, $H_{ЗТВ}(\nu, A)$ та $b(\nu, A)$ для кожного значення сили струму та швидкості наплавлення. З аналізу графіків встановлено, що максимальні значення твердості наплавленого металу H , металу ЗТВ $H_{ЗТВ}$, мінімальні значення величини кристаліту δ та висоти валику b досягаються найчастіше за частотних діапазонів від 2,5 Гц до 3,0 Гц та від 4,0 Гц до 4,5 Гц. Саме співвідношення факторів сили струму I_n та швидкості V_n визначає величину амплітуди.
6. У порівнянні з наплавленням без впливу коливань на певних технологічних режимах завдяки коливанням можна суттєво впливати на показники твердості та розміри валику:
 - значення твердості H наплавленого металу збільшити від 3,0 % до 52,0 %;
 - значення твердості ЗТВ $H_{ЗТВ}$ збільшити від 27,0 % до 144,0 %;
 - ширину валику W збільшити від 1,3 рази до 1,8 рази;
 - висоту валику b зменшити від 1,2 рази до 6,4 рази.
 - глибину проплавлення зменшити від 1,5 рази до 2,0 рази.
7. Побудована аналітична модель розрахунку ширини наплавленого валику дає середню відносну похибку близько 18,0 %. Встановлено, що чинник частоти коливань ν впливає несуттєво, а чинники сили струму наплавлення I_n та швидкості наплавлення V_n зовсім не впливають на значення ширини валику W . Основний фактор впливу на значення W є амплітуда коливань A . Найбільше збільшення W за діапазоном від 60,0 % до 80,0 % у порівнянні з

аналогічними технологічними режимами наплавлення без коливань, спостерігається за значеннями амплітуди у межах від 0,006 м до 0,007 м.

8. Визначено оптимальний режим наплавлення за критеріями: мінімальне значення струму наплавлення, максимальна ширина наплавленого валику, мале значення висоти наплавленого валику, мінімальна різниця між значенням твердості наплавленого металу та значенням твердості ЗТВ: $I_n = 100,0$ А, $V_n = 0,0072$ м/с, $\nu = 2,5$ Гц, $A = 0,007$ м. Наплавлений валик за даним режимом має значення твердості та геометричних розмірів, що відповідають розрахунковим у межах визначених відхилень: $H = 2600,0$ МПа, $H_{ЗТВ} = 2800,0$ МПа, $W = 18,3$ мм, $b \approx 0,003$ м.
9. Визначено оптимальний режим наплавлення дротом марки Нп-30ХГСА діаметром 1,2 мм за критерієм твердості наплавленого металу: $I_n = 100,0$ А, $V_n = 0,0061$ м/с, $\nu = 2,5$ Гц, $A = 0,007$ м. Наплавлений валик за даним режимом має середнє значення мікротвердості наплавленого металу $H = 4401,0$ МПа, металу ЗТВ $H_{ЗТВ} = 3150,0$ МПа, що на 23,55 % для наплавленого металу та на 2,6 % для металу ЗТВ вище за зразок, отриманого без коливального впливу за аналогічними значеннями сили струму та швидкості наплавлення.

РОЗДІЛ 5

ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОСТРУКТУРИ НАПЛАВЛЕНОГО МЕТАЛУ І МЕТАЛУ ЗТВ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ СПОСОБУ МОДИФІКУВАННЯ НАПЛАВЛЕНОГО МЕТАЛУ МЕТОДОМ КОЛИВАНЬ ДЕТАЛІ, ЩО НАПЛАВЛЯЄТЬСЯ

Відповідно до розділу 1, основний вплив зовнішніх поперечних коливань зварювальної ванни на мікроструктуру наплавленого металу та металу ЗТВ обумовлює формування певних умов щодо збільшення ступеню диспергування мікроструктури наплавленого металу та, як наслідок, підвищення механічних властивостей наплавленого валику, зокрема твердості. Для аналізу впливу коливань поверхні деталі, що наплавляється, на формування розміру кристаліту та відповідного значення твердості побудована таблиця 5.1, де наведено значення розміру кристаліту δ_{cp} –середньо-арифметичного значення середнього умовного діаметра зерна δ , виміряних (табл. 4.5) по всіх зонах поперечного перетину (рис. 2.13). Кожному значенню δ_{cp} відповідає середньо-арифметичне значення твердості наплавленого металу H_{cp} по зонах перетину (табл. 4.6).

З аналізу таблиці можна бачити, що розмір зерна δ_{cp} зразків, що отримані без впливу коливань, здебільшого лежить в межах від 0,071 мм до 0,183 мм (бал зерна 1 - 4), якому відповідає діапазон значень твердості H_{cp} від 1666,0 МПа до 2220,0 МПа; розмір зерна δ_{cp} зразків, що отримані з впливом коливань є в межах від 0,039 мм до 0,142 мм (бал зерна 3 - 6) за відповідним діапазоном значень твердості H_{cp} від 1843,0 МПа до 2700,0 МПа. Також з таблиці видно, що не завжди дрібному розміру зерна відповідає високе значення твердості у порівнянні із зразками, що отримані без впливу коливань: зразки 5, 13, 17 мають твердість, що не перевищує 2220,0 МПа з розміром зерна від 0,039 мм до 0,048 мм (бал зерна 5,6). З іншого боку, є зразки, у яких навпаки – підвищене значення твердості при великому розмірі зерна: 14, 19 – твердість на рівні від 2236,0 МПа до 2263,0 МПа при розмірі зерна від 0,095 мм до 0,109 мм (бал зерна 3).

Таблиця 5.1 – Значення усередненого умовного діаметра зерна δ_{cp} та відповідні значення балу зерна та усередненого значення твердості наплавленого металу H_{cp} (* позначені режими наплавлення без коливань деталі)

№ зразка	δ_{cp} , мм	Бал зерна за ДСТУ 8972:2019	Погонна енергія кДж/м за залежністю (4.2')	H_{cp} , МПа
1*	0,183	1,2	688,2	1 675,0
1	0,078	4	10,95	1 916,66
2	0,089	3,4	14,6	2 016,66
3	0,079	4	22,68	2 220,0
4	0,039	6	30,52	2263,33
5	0,048	5,6	20,4	2 106,66
6	0,075	4	38,3	2 070,0
7*	0,107	3	649,16	1 666,66
7	0,08	4	19,18	2 196,66
8	0,068	4,5	25,15	2 260,0
9	0,081	4	17,89	2 370,0
10	0,041	6	26,78	2 700,0
11	0,093	3,4	18,7	2 173,33
12	0,091	3,4	25,5	2290,0
13*	0,071	4	634,68	2 143,33
13	0,039	6	28,8	2 113,33
14	0,095	3	55,8	2 236,66
15	0,073	4	35,96	2 530,0
16	0,142	2,3	51,35	2 060,0
17	0,044	6	81,94	1 843,33
18	0,104	3	35,2	2 153,33
19*	0,085	4	635,16	2 220,0
19	0,109	3	25,67	2 263,33
20	0,063	4,5	19,56	2 130,0
21	0,114	3	58,4	1 926,66
22	0,066	4,5	40,58	2 243,33
23	0,13	2,3	40,56	2 203,33
24	0,100	3	29,81	2 133,33
25*	0,042	6	637,78	2 000,0
25	0,079	4	60,63	1 956,66

Дані факти свідчать про те, що збільшення ступеню диспергування мікроструктури не є єдиним способом впливу за посередництвом коливань деталі,

що наплавляється, на формування структури наплавленого металу та його корисних властивостей. Однією з ймовірних причин, яка за певних умов превалює над зміною розміру кристаліту, є показник твердості складових мікроструктури. З точки зору підвищення твердості пріоритетним є формування більш твердих складових, зокрема голчастого фериту, що обумовлює необхідність подальшого дослідження впливу на мікроструктуру коливань зварювальної ванни не тільки, як фактор її диспергування, але й як фактор впливу на формування в її структурі корисних складових.

Зменшення погонної енергії на порядок у режимів наплавлення під впливом коливань (10,0 кДж/м - 81,0 кДж/м) у порівнянні з режимами без коливань (634,0 кДж/м - 688 кДж/м) дає можливість отримати бал зерна 5, 6 одиниць, що свідчить про ефективність використання коливань даного типу на струмах наплавлення від 100,0 А до 175,0 А. При наплавленні з силою струму 200,0 А ключовою особливістю є нівелювання фактору коливань на великих швидкостях наплавлення (0,0061 м/с - 0,0072 м/с) незважаючи на зменшення погонної енергії. Так під впливом коливань на швидкості наплавлення 0,0072 м/с бал зерна 4, без впливу – 6. Даний факт свідчить, що за таких умов наплавлення ключовим фактором є саме значення миттєвої швидкості охолодження розплаву зварювальної ванни, а не погонна енергія.

5.1 Вплив коливань зварювальної ванни на розмір кристаліту наплавленого металу

Щодо вивчення впливу коливань на розмір кристаліту побудовані відповідні контурні графіки за регресійною моделлю (4.10) (Додаток Е). Аналіз графіків доводить, що характер впливу основних факторів на розмір кристаліту зберігається: мінімальне значення розміру кристаліту найчастіше формується за частот у діапазонах від 2,5 Гц до 3,0 Гц та від 4,0 Гц до 4,5 Гц в залежності від співвідношення сили струму та швидкості наплавлення, які визначають не тільки ефективне значення амплітуди, але й можливість на одному технологічному

режимі – одному значенні сили струму та швидкості наплавлення – отримати мінімальне значення розміру кристаліту на двох коливальних режимах: різних значеннях амплітуди і частоти. На режимах наплавлення $I_n = 100,0 \text{ А} - 150,0 \text{ А}$, $V_n = 0,0072 \text{ м/с}$ (додаток Е, рис. Е.1д, Е.2д, Е.3д) спостерігається мінімальне значення розміру кристаліту на рівні до $60,0 \text{ мкм}$ у всьому діапазоні частот за амплітуди від $3,0 \text{ мм}$ до $6,0 \text{ мм}$. Технологічні режими, що дозволяють використовувати обидва частотних діапазони щодо формування мінімального розміру зерна, є наступні:

- за $I_n = 100,0 \text{ А}$ та $125,0 \text{ А}$, $V_n = 0,0061 \text{ м/с}$ (додаток Е, рис. Е.1г, Е.2г) – $50,0 \text{ мкм} - 80,0 \text{ мкм}$ та $40,0 \text{ мкм} - 60,0 \text{ мкм}$ відповідно;
- за $I_n = 150,0 \text{ А}$, $V_n = 0,0028 \text{ м/с}$ та $V_n = 0,0072 \text{ м/с}$ (додаток Е, рис. Е.3а, Е.3д) – $\leq 80,0 \text{ мкм}$ та $\leq 50,0 \text{ мкм}$ відповідно;
- за $I_n = 175,0 \text{ А}$, $V_n = 0,0072 \text{ м/с}$ (додаток Е, рис. Е.4д) – $\leq 50,0 \text{ мкм}$;
- за $I_n = 200,0 \text{ А}$, $V_n = 0,0039 \text{ м/с}$ та $V_n = 0,0072 \text{ м/с}$ (додаток Е, рис. Е.5б, Е.5д) – $\leq 20,0 \text{ мкм}$ та $\leq 50,0 \text{ мкм}$ відповідно.

Також співвідношення сили струму та швидкості наплавлення дає змогу обрати такий коливальний режим, при якому мінімальний розмір зерна формується при зворотній залежності між амплітудою та частотою: із зменшенням амплітуди зростає частота. Це режими:

- за $I_n = 100,0 \text{ А}$ та $125,0 \text{ А}$, $V_n = 0,0072 \text{ м/с}$ (додаток Е, рис. Е.1д, Е.2д) мінімальний розмір зерна – $\leq 60,0 \text{ мкм}$ – формується із зменшенням амплітуди від $0,004 \text{ м}$ до $0,006 \text{ м}$ у всьому діапазоні частот;
- за $I_n = 175,0 \text{ А}$, $V_n = 0,005 \text{ м/с}$ та $V_n = 0,0061 \text{ м/с}$ (додаток Е, рис. Е.4в, Е.4г) – $\leq 30,0 \text{ мкм}$ та за $I_n = 200,0 \text{ А}$, $V_n = 0,0061 \text{ м/с}$ (додаток Е, рис. Е.5г) – $\leq 40,0 \text{ мкм}$ – зі зменшенням амплітуди від $0,007 \text{ м}$ до $0,003 \text{ м} - 0,005 \text{ м}$ у частотному діапазоні від $4,0 \text{ Гц}$ до $4,5 \text{ Гц}$;
- за $I_n = 200,0 \text{ А}$, $V_n = 0,005 \text{ м/с}$ (додаток Е, рис. Е.5в) – $\leq 30,0 \text{ мкм}$ – зі зменшенням амплітуди від $0,007 \text{ м}$ до $0,004 \text{ м} - 0,005 \text{ м}$ у частотному діапазоні від $3,5 \text{ Гц}$ до $4,5 \text{ Гц}$.

Таким чином, формувати зерно мінімального розміру за певних режимів можна на окремих частотах у всьому діапазоні амплітуд, а також на окремих амплітудах у всьому діапазоні частот.

Порівняльні оцінки середніх величин розміру кристаліту наплавленого металу, що отриманий без впливу коливань (табл. 5.1) відносно мінімального розміру кристаліту, що формуються за аналогічним технологічним режимом, але з використанням коливань зварювальної ванни (додаток Е), наведено у таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Співвідношення середніх значень умовного діаметру зерна наплавленого металу валиків, отриманих без коливань $\delta_{CP}^{\delta/k}$, та середнього значення умовного діаметру наплавленого металу валиків, отриманих з коливаннями $\delta_{CP}^{кол}$ за додатком Е

Номер режиму наплавлення з коливаннями; без коливань*	Струм наплавлення I_n , А	Швидкість наплавлення V_n , м/год	Параметр $\frac{I_n}{V_n}$, А·год/м	Середній розмір $\delta_{CP}^{\delta/k}$ кристаліту без впливу коливань (*) за табл. 5.1, мкм	Мінімальний розмір кристаліту $\delta_{CP}^{кол}$ з використанням коливань за контурними графіками додатку Е, мкм/ Відповідні амплітуда А, мм; частота ν, Гц
1; 1*	100,0	10,0	10,0	183,0	30,0/ 3,0; 4,5
7; 7*	125,0	14,0	9,0	107,0	30,0/ 5,0 - 7,0; 4,5
13; 13*	150,0	18,0	8,3	71,0	20,0/ 4,0 – 5,0; 4,5
19; 19*	175,0	22,0	8,0	85,0	30,0/ 3,0 - 5,0; 4,5
25; 25*	200,0	26,0	7,7	42,0	50,0/ 3,0 – 5,0; 2,5 – 3,0 та 3,0 – 7,0; 4,0 - 4,5

Відповідно до цієї таблиці побудована порівняльна діаграма залежності розміру кристаліту відносно параметру, що характеризує відношення сили струму до швидкості наплавлення (рис. 5.1).

З аналізу даних таблиці 5.2 та діаграми (рис.5.1) видно, що при збільшенні параметру $\frac{I_H}{V_H}$ збільшується і різниця між значеннями розміру кристаліту наплавленого металу, отриманого без- та з використанням коливань. Тобто, вплив коливань даного типу щодо диспергування мікроструктури наплавленого металу є найбільш ефективним за значеннями сили струму наплавлення $I_H = 100,0$ А - 175,0 А. За сили струму наплавлення у 200,0 А та швидкості не менше ніж 0,0072 м/с спостерігається зворотній ефект – розмір кристаліту буде більше при використанні коливань. Швидкість наплавлення щодо зменшення розміру кристаліту змінюється у досить широких межах: від 0,0028 м/с до 0,0061 м/с. Отже, основним параметром щодо формування розміру кристаліту є співвідношення сили струму та швидкості наплавлення – тобто погонна енергія, виходячи з того, що напруга на дузі в розглянутій області режимів змінюється не значно.

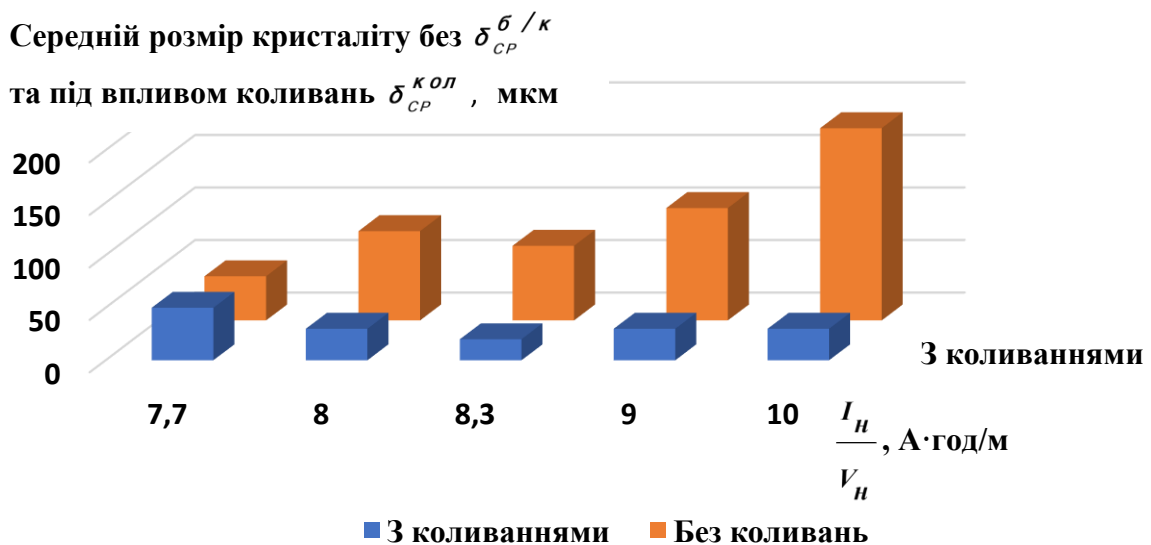


Рисунок 5.1 – Діаграма співвідношення середніх значень умовного діаметру зерна наплавленого металу валиків, отриманих без коливань $\delta_{CP}^{б/к}$, та мінімального значення умовного діаметру наплавленого металу валиків, отриманих з коливаннями $\delta_{CP}^{кол}$ за додатком Е

З таблиці 5.1 можна зробити висновок: розмір кристаліту завдяки застосуванню коливань можна зменшити від 2,8 рази до 6,1 рази в порівнянні з аналогічними режимами без їх впливу.

5.2 Щодо впливу розміру кристаліту на значення твердості наплавленого металу

За експериментальними даними з твердості (табл. 4.6) та відповідними значеннями діаметру умовного зерна наплавленого металу (табл. 4.5) побудовано діаграму (рис. 5.2) щодо середнього значення твердості за верхньою, середньою та нижньою частинами наплавленого валику та відповідного середнього значення діаметру умовного зерна наплавленого металу.

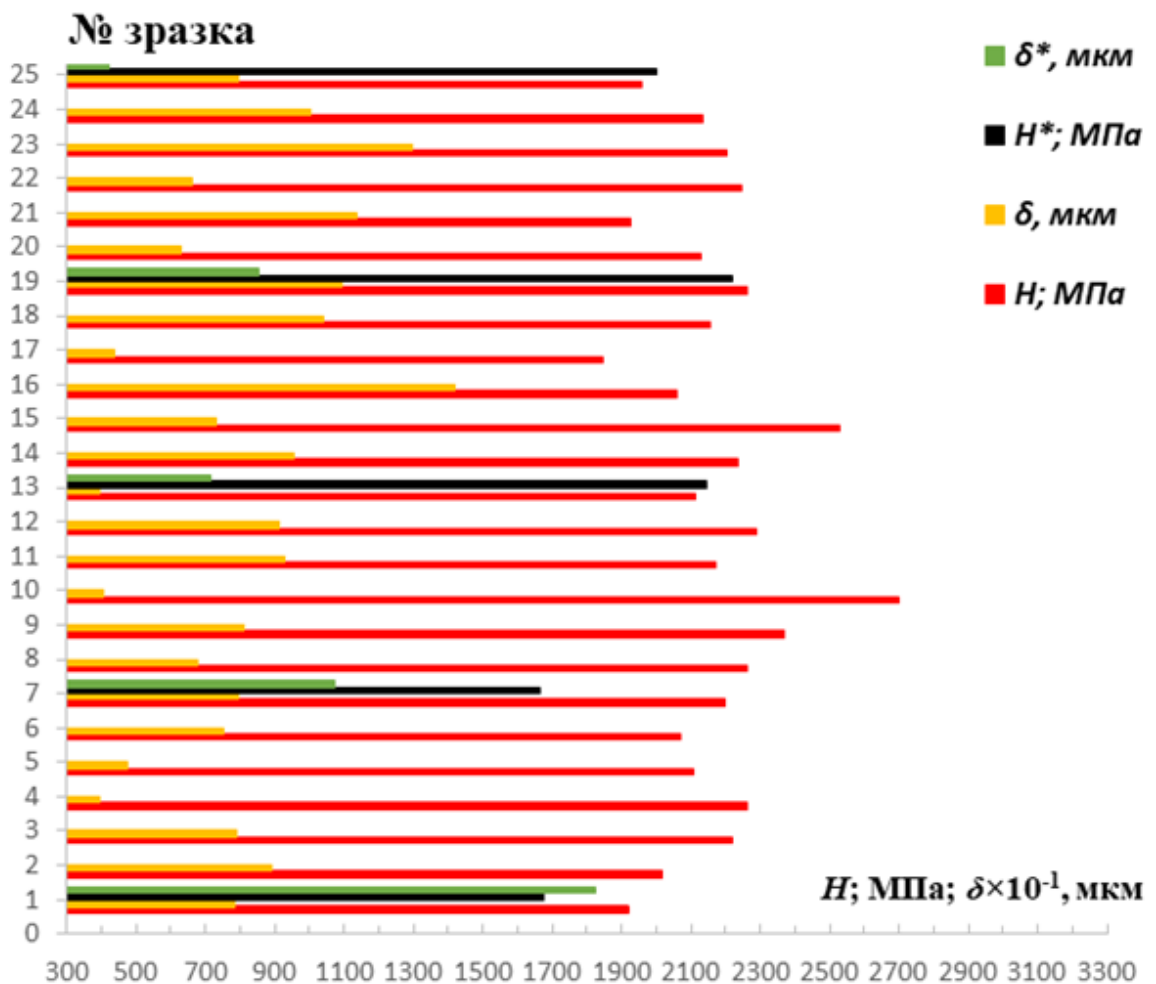


Рисунок 5.2 – Порівняльна діаграма середніх значень ширини кристалітів мікроструктури δ та твердості наплавленого металу H . * – величини, що відносяться до режимів наплавлення без впливу коливань

Із загального аналізу діаграми видно, що коливання даного типу найбільш ефективні у діапазоні струмів від 100,0 А до 125,0 А, про що свідчить порівняння величин твердості наплавленого металу та розміру кристаліту зразків, що отримані без впливу коливань із зразками, отриманими з коливаннями:

- за $I_n = 100,0$ А, $V_n = 10,0$ м/год., б/к – твердість наплавленого металу 1675,0 МПа з відповідним середнім розміром кристаліту у 182,66 мкм, але при застосуванні коливань за частоти у 4,0 Гц та за амплітуди 0,007 м – 1916,66 МПа з відповідним середнім розміром кристаліту у 78,33 мкм (режим 1);
- за $I_n = 125,0$ А, $V_n = 14,0$ м/год., б/к – твердість наплавленого металу 1666,66 МПа з відповідним середнім розміром кристаліту у 107,0 мкм; при застосуванні коливань за частоти 3,0 Гц та за амплітуди 0,007 м – 2196,66 МПа з відповідним середнім розміром кристаліту у 79,66 мкм (режим 7).

За діапазоном струму наплавлення від 150,0 А до 200,0 А позитивний вплив коливань нівелюється: на режимах 13, 19, 25 значення твердості наплавленого металу майже однакові, а розмір кристаліту є значно меншим саме у тих зразків, що отримані без впливу коливань.

З діаграми видно, що найбільше середнє значення твердості 2700,0 МПа з відповідним середнім розміром кристаліту у 40,5 мкм отримано за режимом: $I_n = 125,0$ А, $V_n = 26,0$ м/год., $\nu = 2,5$ Гц, $A = 0,006$ м (режим 10). Інші режими при мінімальному розмірі зерна мають посереднє значення твердості:

- за $I_n = 100,0$ А, $V_n = 22,0$ м/год., $\nu = 2,5$ Гц, $A = 0,004$ м (режим 4) – середнє значення твердості 2262,33 МПа з відповідним середнім розміром кристаліту у 39,33 мкм;
- за $I_n = 100,0$ А, $V_n = 26,0$ м/год., $\nu = 3,0$ Гц, $A = 0,005$ м (режим 5) – 2106,66 МПа з відповідним середнім розміром кристаліту у 47,66 мкм;
- за $I_n = 150,0$ А, $V_n = 18,0$ м/год., $\nu = 2,5$ Гц, $A = 0,007$ м (режим 13) – 2113,33 МПа з відповідним середнім розміром кристаліту у 39,33 мкм;

- за $I_n = 175,0$ А, $V_n = 14,0$ м/год., $v = 2,5$ Гц, $A = 0,003$ м (режим 17) – 1843,33 МПа з відповідним середнім розміром кристаліта у 43,66 мкм.

З іншого боку, на деяких технологічних режимах наплавлення спостерігається збільшення твердості разом зі збільшенням розміру кристаліту:

- за $I_n = 125,0$ А, $V_n = 22,0$ м/год, $v = 4,5$ Гц, $A = 0,005$ м (режим 9) – 2370,0 МПа з відповідним середнім розміром кристаліта у 81,0 мкм;
- за $I_n = 150,0$ А, $V_n = 72,0$ м/год, $v = 3,5$ Гц, $A = 0,004$ м (режим 15) – 2530,0 МПа з відповідним середнім розміром кристаліта у 73,0 мкм.

Даний факт свідчить, що величина твердості формується не тільки завдяки ступеню диспергування мікроструктури наплавленого металу, але й за рахунок твердості структурних складових мікроструктури. Таким чином величина твердості формується завдяки 2 факторам: 1-й – розмір кристаліту, 2-й – твердість структурних складових мікроструктури. В залежності від домінування одного з цих факторів і буде визначатись твердість:

- за режимів наплавлення: $I_n = 100,0$ А, $I_n = 125,0$ А, $I_n = 150,0$ А та $I_n = 175,0$ А, $V_n = 0,0072$ м/с (додаток Б, рис. Б.1, д - Б.4, д), а також за $I_n = 200,0$ А, $V_n = 0,005$ м/с (додаток Б, рис. Б.5, в) – максимальні значення твердості від 2300,0 МПа до 3100,0 МПа формуються при значеннях розміру кристаліту у межах від 30,0 мкм до 60,0 мкм (додаток Е, рис. Е.1, д - рис. Е.4, д, рис. Е.5, в), тобто спостерігається домінування тієї складової фактору коливань, що сприяє подрібненню мікроструктури;
- за режимів наплавлення: $I_n = 150,0$ А, $V_n = 0,0028$ м/с та $V_n = 0,0039$ м/с (додаток Б, рис. Б.3, а - рис. Б.3, б); $I_n = 200,0$ А, $V_n = 0,0039$ м/с, $V_n = 0,0061$ м/с та $V_n = 0,0072$ м/с (додаток Б, рис. Б.5, б, рис. Б.5, г - рис. Б.5, д) – максимальні значення твердості є від 2235,0 МПа до 3200,0 МПа формуються з відповідним середнім розміром кристаліта у межах від 40,0 мкм до 200,0 мкм (додаток Е, рис. Е.3, а - рис. Е.3, б, рис. Е.5, б, рис. Е.5, г - рис. Е.5, д), тобто розмір кристаліту формується завдяки обом складовим формування

мікроструктури; характерним показником є те, що максимальні значення твердості не досягаються при мінімальних значеннях розміру кристаліту;

– за режимів наплавлення $I_n = 150,0$ А, $V_n = 0,005$ м/с (додаток Б, рис. Б.3, в) та $I_n = 175,0$ А, $V_n = 0,0061$ м/с (додаток Б, рис. Б.4, г) – максимальні значення твердості від 2400,0 МПа до 2700,0 МПа формуються при значеннях розміру кристаліту у межах на певних амплітудно – частотних характеристиках або завдяки збільшенню ступеню диспергування – від 20,0 мкм до 50,0 мкм, або завдяки одночасному впливу двох факторів формування – від 80,0 мкм до 100,0 мкм (додаток Б, рис. Б.3, в, рис. Б.4, г); у випадку впливу двох факторів формування максимальні значення твердості та відповідного диспергування мікроструктури не досягаються.

Таким чином, фактор струму та швидкості наплавлення визначають характер впливу коливань щодо формування мікроструктури.

Даний тип коливань дає можливість зменшити розмір кристаліту у порівнянні з режимами наплавлення без впливу коливань від 30,0 мкм до 20,0 мкм, що обумовить формування твердості наплавленого металу на рівні до 3000,0 МПа в діапазоні струмів наплавлення від 100,0 А до 150,0 А, що дає певні переваги серед інших способів наплавлення та зварювання.

В роботі А.А. Гайворонский та ін. (рос.) [119] отримали твердість наплавленого зварювальним дротом типу Св-08Г2С металу на рівні 2100,0 МПа при мінімальному розмірі зерна кристаліту від 30,0 мкм до 60,0 мкм. Зварювання здійснювалось під шаром флюсу дротом діаметром 2,0 мм колісної сталі марки 2 за ГОСТ 10791-89 (С: 0,55 % - 0,65 %; Si: 0,22 % - 0,45 %; Mn: 0,50 % - 0,90 %; V: \leq 0,10 %; P: \leq 0,035 %; Fe: інше).

При зварюванні зразків з нержавіючої (тип 1.4003) та вуглецевої сталі (тип SS400) зварювальним дротом ER70S діаметром 0,8 мм у середовищі газової суміші аргону та вуглекислого газу С. Onma та J. Srithorn були отримані зразки з максимальною твердістю наплавленого металу на рівні 329,0 HV (3226,0 МПа) при розмірі зерна, що не перевищує 50,0 мкм - 60,0 мкм [120].

При отриманні кутового зварного з'єднання зі сталі типу *S355J2+N*, що здійснювалось зварювальним дротом *ER70S-6* діаметром 1,2 мм у суміші аргону та вуглекислого газу, *M.F.A. Sabana* та інш. отримали твердість наплавленого металу на рівні 219,0 *HV* (2147,0 МПа) при середньому розмірі зерна 70,0 мкм - 80,0 мкм [121].

З огляду на дані, отримані іншими дослідниками, слід зазначити, що коливання даного типу ефективно впливають на ступінь диспергування мікроструктури і дають змогу отримати твердість наплавленого металу помітно вищу у порівнянні з іншими способами наплавлення або зварювання дротом типу Св-08Г2С деталей з вуглецевої сталі.

5.3 Вплив коливань на формування структурних складових наплавленого металу та ЗТВ

Вплив на мікроструктуру аналізувався відповідно до таблиці 4.1.

Зразки, що наплавлені при силі струму наплавлення 100,0 А та 125,0 А.

Мікроструктура наплавлених валиків, що наплавлялися без впливу коливань за технологічними режимами $I_n = 100,0$ А, $V_n = 0,0028$ м/с та $I_n = 125,0$ А, $V_n = 0,0039$ м/с (рис. 5.3), має класичну феритно-перлітну структуру з досить широкими литими кристалітами, а також з феритними прошарками по границям литих кристалітів, що являють собою виділення полігонального фериту (табл. 5.3). У зразка, що наплавлявся за $I_n = 125,0$ А, характерною рисою мікроструктури є найбільш широкі кристаліти у верхній і нижній частині валику. У ЗТВ спостерігається феритно-перлітна структура.

Зразки, що наплавлені за сили струму у 100,0 А та 125,0 А (рис. 5.4) з використанням коливань суттєво відрізняється від мікроструктури зразків, наплавлених без них, а саме: різними формами фериту полігонального (рис. 5.4, а (I)) – у вигляді тонких прошарків по границях литих кристалітів; поліедричного фериту (рис. 5.4, а (II)) – у вигляді окремих або груп зерен, які примикають здебільшого до полігонального фериту; пластинчатого фериту з

впорядкованою 2-ю фазою (рис. 5.4, а (IV)), яка є виділенням карбідів у вигляді паралельних рядів у феритній матриці.

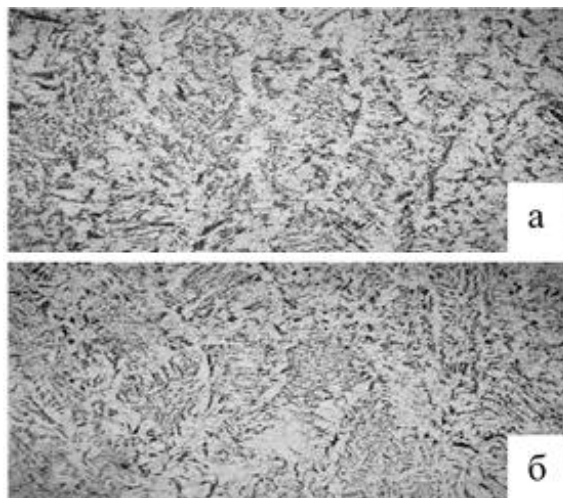


Рисунок 5.3 – Характерна мікроструктура зразків ($\times 200$), що наплавлені без впливу коливань за: а – $I_n = 100,0$ А; б – $I_n = 125,0$ А

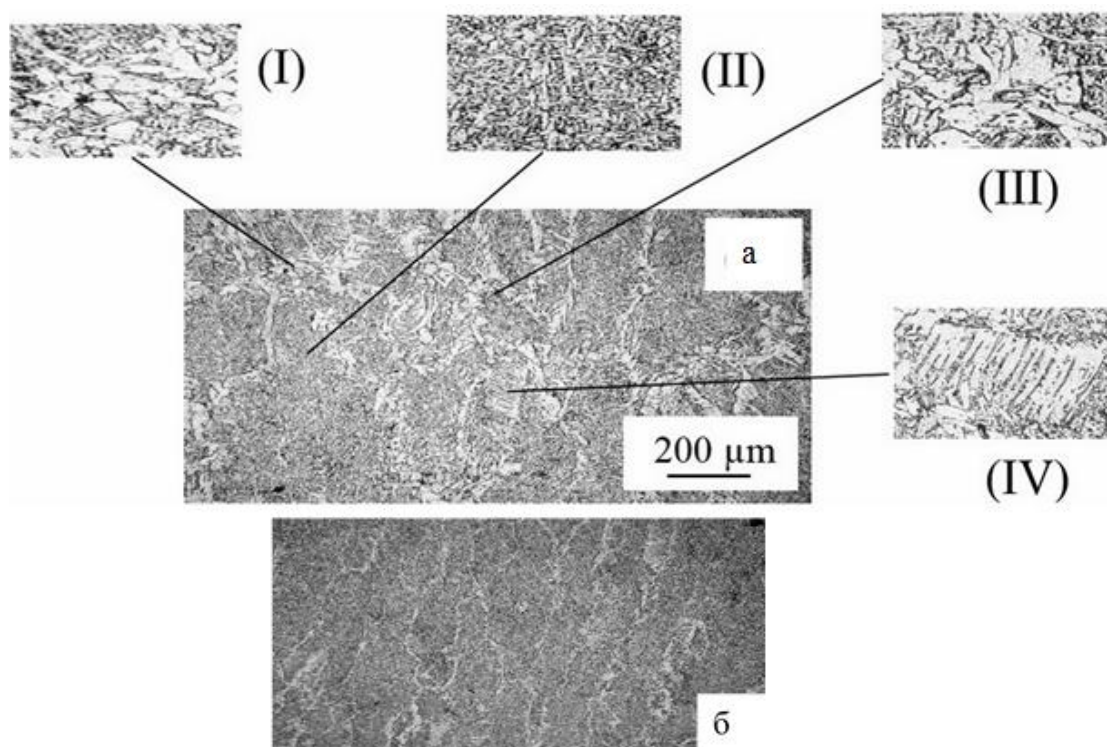


Рисунок 5.4 – Характерна мікроструктура зразків ($\times 200$), що наплавлені з використанням коливань за: а – $I_n = 100,0$ А: (I) – полігональний ферит, (II) – голчастий ферит, (III) – полідричний ферит, (IV) – пластинчатий ферит з вторинною фазою; б – $I_n = 125,0$ А

Таблиця 5.3 – Значення ширини феритних оторочок мікроструктур наплавлених зразків за наведеними технологічними та коливальними режимами наплавлення (* позначені режими наплавлення без коливань деталі)

№ зразка	Режим наплавлення				Ширина феритних оторочок (центр валику), мкм		
	I_n , А	V_n , м/с	ν , Гц	A , м	Max	Min	Середнє
1*	100,0	0,0028			30,0	15,0	23,0
1		0,0028	4,0	0,007	8,0	5,0	7,0
2		0,0039	3,5	0,006	20,0	10,0	14,0
3		0,005	4,5	0,003	5,0	2,5	4,2
4		0,0061	2,5	0,004	< 5,0	3,0	4,0
5		0,0072	3,0	0,005	< 5,0	7,0	6,0
6	125,0	0,0028	3,5	0,003	20,0	8,0	14,0
7*		0,0039			40,0	20,0	32,0
7		0,0039	3,0	0,007	15,0	7,0	11,0
8		0,005	4,0	0,004	5,0	3,0	5,0
9		0,0061	4,5	0,005	7,0	5,0	5,5
10		0,0072	2,5	0,006	-	-	-
11	150,0	0,0028	4,5	0,006	40,0	15,0	26,0
12		0,0039	4,0	0,005	15,0	5,0	10,5
13*		0,005			15,0	5,0	10,0
13		0,005	2,5	0,007	5,0	2,5	4,0
14		0,0061	3,0	0,003	5,0	3,0	4,0
15		0,0072	3,5	0,004	7,0	4,0	5,5
16	175,0	0,0028	3,0	0,004	50,0	15,0	28,3
17		0,0039	2,5	0,003	15,0	8,0	10,2
18		0,005	3,5	0,005	12,0	5,0	9,4
19*		0,0061			10,0	6,0	9,0
19		0,0061	4,0	0,006	25,0	15,0	19,2
20		0,0072	4,5	0,007	12,0	8,0	10,6
21	200,0	0,0028	2,5	0,005	40,0	20,0	33,3
22		0,0039	4,5	0,004	25,0	10,0	17,5
23		0,005	3,0	0,006	25,0	10,0	18,0
24		0,0061	3,5	0,007	30,0	20,0	24,0
25*		0,0072			8,0	3,0	5,0
25		0,0072	4,0	0,003	25,0	8,0	15,0

Окрім того, спостерігається голчастий ферит (рис. 5.4, а (II)) у центрі литих кристалітів, а також невеликі ділянки перліту, які мають вигляд невеличких темних виділень, що примикають до феритних зерен. Голчастий ферит супроводжується

виділенням МАК – фази, що також сприяє збільшенню твердості та ударної в'язкості – за літературними даними [33], [34], [48], [50], [56], [62].

ЗТВ зразків є феритно-перлітною, але на відміну від зразку, що наплавлений без коливань за $I_n = 100,0$ А, в структурі є ділянки пластичного фериту, а за швидкостями наплавлення в межах від 0,005 м/с - 0,0072 м/с з'являється сорбітоподібний перліт, що обумовлює підвищення твердості. В мікроструктурі наплавленого металу, що отриманий за режимом наплавлення $I_n = 125,0$ А, $V_n = 0,0072$ м/с, $A = 0,006$ м, $\nu = 2,5$ Гц з'являється суміш верхнього та нижнього бейніту, що суттєво підвищує твердість. У зоні ж ЗТВ також спостерігається підвищення твердості завдяки формуванню мартенситно-бейнітної мікроструктури (рис. 5.5). Таким чином, для зварювального дроту типу Св-08Г2С та основного металу типу СтЗсп, даний тип коливань модифікує мікроструктуру наплавленого металу та металу ЗТВ від феритно-перлітної до бейнітної, але без суттєвої долі мартенситної складової, що узгоджується з відповідними положеннями робіт авторів [110] і [111].



Рисунок 5.5 – Характерна мікроструктура зразку ($\times 200$), що наплавлений за режимом $I_n = 125,0$ А, $V_n = 0,0072$ м/с, $A = 0,006$ м, $\nu = 2,5$ Гц

Між собою зразки, що наплавлені з використанням коливань, відрізняються розміром феритної оторочки (табл. 5.3).

Зменшення погонної енергії під впливом коливань (10,0 кДж/м - 81,0 кДж/м) у порівнянні з режимами без коливань (634,0 кДж/м - 688,0 кДж/м), сприяє зменшенню ширини феритних прошарків від 23,0 мкм - 32,0 мкм (1 666,66 МПа - 1 675 МПа) до 4,0 мкм - 14,0 мкм при наплавленні із струмом 100,0 А та 125,0 А, що досягається у усьому діапазоні значень швидкості наплавлення, частот та

амплітуд коливань означеного типу. Найбільше середнє значення твердості наплавленого металу, що було практично досягнуто за даними значеннями струму наплавлення, знаходиться на рівні 2263,33 МПа та 2700,0 МПа за частоти коливань у 2,5 Гц та за амплітуд у 0,004 м та 0,006 м відповідно і швидкості наплавлення за діапазоном від 0,0061 м/с до 0,0072 м/с.

При наплавленні із струмом 150,0 А без впливу коливань ширина феритних оторочок є 10,0 мкм (2 143,33 МПа). Під впливом коливань із швидкістю наплавлення за діапазоном від 0,0039 м/с до 0,0072 м/с ширина феритної оторочки знаходиться у межах від 4,0 мкм до 10,5 мкм. За швидкості наплавлення у 0,0028 м/с ширина феритного прошарку складає 26,0 мкм. Найбільше середнє значення твердості наплавленого металу, що було практично досягнуто за струмом наплавлення у 150,0 А, становить 2 530,0 МПа, що досягнуто за частоти коливань у 3,5 Гц та за амплітуди у 0,004 м і швидкості наплавлення у 0,0072 м/с.

При наплавленні із струмом у межах від 175,0 А до 200,0 А без впливу коливань ширина феритних оторочок знаходиться в межах від 5,0 мкм до 9,0 мкм (2000,0 МПа - 2 220,0 МПа). Під впливом коливань за всіма значеннями швидкості наплавлення, частот та амплітуд величина феритних прошарків знаходиться в межах від 9,4 мкм до 33,3 мкм. Найбільше середнє значення твердості наплавленого металу, що було практично досягнуто за струмом наплавлення у діапазоні від 175,0 А - 200,0 А, становить 2 203,33 МПа - 2263,0 МПа за частоти коливань у 3,0 Гц та 4,0 Гц - 4,5 Гц і за амплітуди від 0,004 м до 0,006 м.

З даного аналізу видно, що найбільш ефективно зменшення феритної оторочки під впливом коливань відбувається за діапазоном струму наплавлення від 100,0 А до 150,0 А та швидкості наплавлення від 0,0061 м/с до 0,0072 м/с за частоти коливань в межах від 2,5 Гц до 3,5 Гц та амплітуди від 0,004 м - 0,006 м. За струмом наплавлення у діапазоні від 175,0 А до 200,0 А вплив коливань має негативний ефект щодо розміру феритної оторочки, що обумовлено збільшенням значення миттєвої швидкості охолодження у порівнянні з режимами наплавлення без впливу коливань.

Таким чином, наплавлення за заданими значеннями сили струму з використанням коливань однозначно покращують мікроструктуру наплавленого металу та металу ЗТВ у порівнянні з наплавленням без коливального впливу. Найбільше значення у формуванні ступеню якості мікроструктури відіграють параметри технологічного режиму – сила струму та швидкість наплавлення, збільшення яких позитивним чином впливає на мікроструктуру, а також – збільшення амплітуди коливань, у той самий час, як значення частоти повинно бути мінімальним.

Зразки, що наплавлені при силі струму наплавлення 150,0 А.

Мікроструктура зразків, що наплавлені за заданим значенням струму, мають майже такі самі структурні складові, що й за значеннями у 100,0 А та 125,0 А. Але разом з пластинчатим феритом з упорядкованою та неупорядкованою 2-ю фазою з'являється відманштетова структура на деяких режимах, що свідчить про перегрів металу. Вплив коливань на мікроструктуру також не є однозначним. Так зразок, що наплавлений без коливань за режимом $I_n = 150,0$ А, $V_n = 0,005$ м/с, має структуру подібну до зразка, що наплавлявся з використанням коливань за режимом $I_n = 150,0$ А, $V_n = 0,0028$ м/с, $A = 0,006$ м, $\nu = 4,5$ Гц. Ця структура являє собою досить широкі виділення полігонального фериту, що містяться по границям литих кристалітів великих зерен поліедричного фериту, а також ділянок відманштетової структури, перліту та голчастого фериту. Структура ДВЗ ЗТВ складається з феритних зерен, ділянок перліту як у вигляді окремих зерен, так і оторочок по границям феритних зерен (рис. 5.6). Збільшення швидкості наплавлення до 0,005 м/с, амплітуди до максимального значення у 0,007 м, а частоти навпаки – зменшення до мінімального значення у 2,5 Гц призводить до зміни мікроструктури: полігональний ферит спостерігається у вигляді білих прошарків по границям литих кристалітів, поліедричний ферит – у вигляді окремих зерен, ділянки феритно-перлітної структури, що орієнтована по відманштету, голчастий ферит та пластинчатий ферит з упорядкованою та неупорядкованою 2-ю фазою (рис. 5.7). У

ДВЗ ЗТВ спостерігаються великі зерна зернистого перліту, що оконтурені тонкими феритними прошарками.

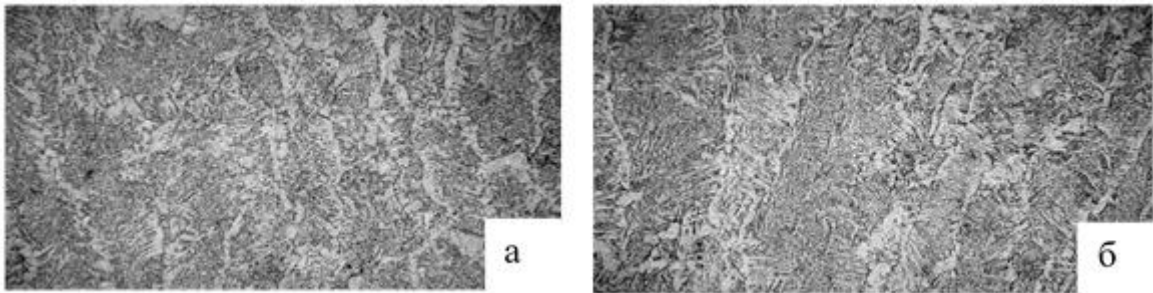


Рисунок 5.6 – Характерна мікроструктура зразків ($\times 200$), що наплавлені за режимом: а – $I_n = 150,0$ А, $V_n = 0,0028$ м/с, $A = 0,006$ м, $\nu = 4,5$ Гц;
б – $I_n = 150,0$ А, $V_n = 0,005$ м/с, без впливу коливань

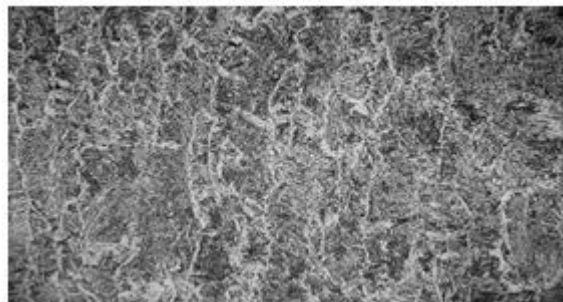


Рисунок 5.7 – Характерна мікроструктура зразку ($\times 200$), що наплавлений за режимом: $I_n = 150,0$ А, $V_n = 0,005$ м/с, $A = 0,007$ м, $\nu = 2,5$ Гц

Інші зразки, що наплавлені за даним значенням сили струму, мають подібну структуру, яка у порівнянні з вищезначеними зразками складається з більш вузьких виділень полігонального фериту, значно меншого розміру зерен поліедричного фериту, причому ділянки відманштетової структури майже не спостерігаються, а також є небагато перліту – темні виділення, що в основному примикають до полігонального та поліедричного фериту. Структура ДВЗ ЗТВ складається з дрібних зерен фериту та перліту з перевагою останнього. Між собою мікроструктура зразків в основному відрізняється розміром феритної оторочки (табл. 5.3) та ступенем диспергування мікроструктури (табл. 4.5 пункт 4.1, розділ 4). Загальний вигляд мікроструктури наплавленого металу зразків, що

отримані під впливом коливань за силою струму наплавлення у 150,0 А, наведено на рисунку 5.8.

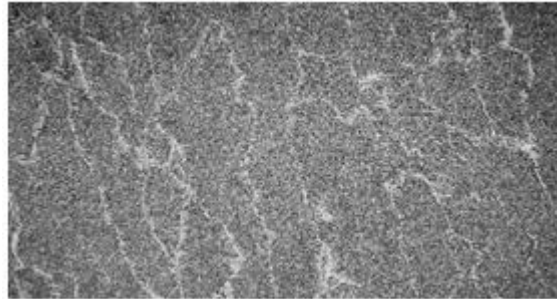


Рисунок 5.8 – Характерна мікроструктура зразків ($\times 200$), що наплавлені за режимами: $I_n = 150,0$ А, $V_n = 0,0039$ м/с, $A = 0,005$ м, $\nu = 4$ Гц; $I_n = 150,0$ А, $V_n = 0,0061$ м/с, $A = 0,003$ м, $\nu = 3,0$ Гц; $I_n = 150,0$ А, $V_n = 0,0072$ м/с, $A = 0,004$ м, $\nu = 3,5$ Гц

З аналізу зразків, наплавлених за даним значенням сили струму, витікає, що низьке значення швидкості наплавлення 0,0028 м/с майже нівелює високі значення параметрів коливань, але збільшення швидкості до 0,0039 м/с у поєднанні з досить високою частотою у 4,0 Гц та амплітудою у 0,005 м значно покращує мікроструктуру та позбавляє її від перегріву, що дає схожий ефект при високих швидкостях наплавлення у межах від 0,0061 м/с до 0,0072 м/с, але з невисокими значеннями амплітудно-частотних параметрів. Таким чином, за заданим значенням сили струму покращення мікроструктури відбувається в першу чергу за рахунок високої швидкості наплавлення, а збільшення значень параметрів коливань підвищує ефективність цього покращення.

Зразки, що наплавлені при силі струму наплавлення 175,0 А.

Наплавлений метал зразку, що наплавлявся за режимом $I_n = 175,0$ А, $V_n = 0,0061$ м/с, має мікроструктуру, що складається з пластинчатого фериту з упорядкованою та неупорядкованою 2-ю фазою, а також невеликими ділянками голчастого, полігонального та поліедричного феритів та перліту, також є ділянки з відманштетовою структурою. Мікроструктура ДВЗ ЗТВ складається з фериту та тонких пластинок перліту. Схожу мікроструктуру мають зразки, що наплавлені з використанням коливань за швидкостями наплавлення 0,0028 м/с, 0,0039 м/с та

0,0061 м/с (рис. 5.9), але вони мають значно більше полігонального та поліедричного типів фериту у своїй мікроструктурі. Між собою зразки, що наплавлені з використанням коливань за швидкостями наплавлення 0,0028 м/с та 0,0039 м/с, відрізняються не тільки ступенем диспергування мікроструктури та розміром феритних оторочок (табл. 5.3), але й певними структурними особливостями. Так зразок, що наплавлений за режимом $I_n = 175,0$ А, $V_n = 0,0028$ м/с, $A = 0,004$ м, $\nu = 3,0$ Гц, має у центрі кристалітів голчастий ферит з так званим «кошиковим плетінням» [122].

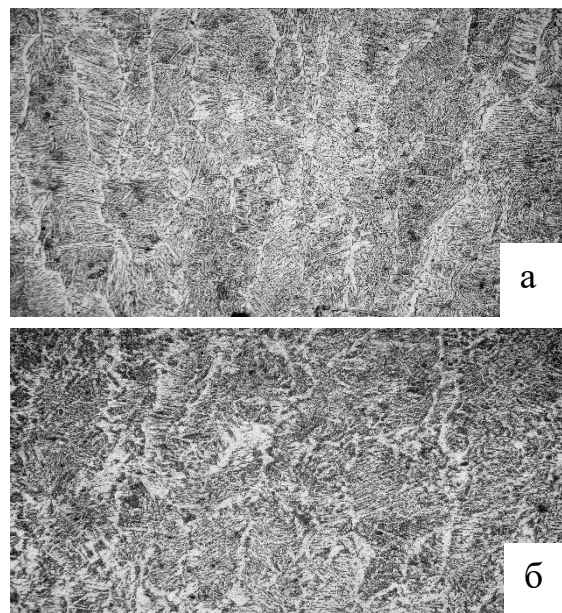


Рисунок 5.9 – Характерна мікроструктура зразків ($\times 200$), що наплавлені за режимами: а – $I_n = 175,0$ А, $V_n = 0,0061$ м/с, без впливу коливань;
б – $I_n = 175,0$ А, $V_n = 0,0028$ м/с, $0,0039$ м/с, $0,0061$ м/с, з коливаннями

У мікроструктурі ДВЗ ЗТВ цього зразку основними складовими є ферит та зернистий і пластинчатий типи перліту. Зразок, що наплавлений за режимом $I_n = 175,0$ А, $V_n = 0,0039$ м/с, $A = 0,003$ м, $\nu = 2,5$ Гц, має у центрі більш вузькі виділення полігонального фериту, а зерна поліедричного фериту є значно менші. Окрім того, у центрі кристалітів спостерігається здебільшого пластинчатий ферит з упорядкованою та неупорядкованою 2-ю фазою, а мікроструктура ДКЗ ЗТВ є феритно-перлітною.

Зразки, що наплавлені за режимами $I_n = 175,0$ А, $V_n = 0,005$ м/с, $A = 0,005$ м, $\nu = 3,5$ Гц та $I_n = 175,0$ А, $V_n = 0,0072$ м/с, $A = 0,007$ м, $\nu = 4,5$ Гц, мають мікроструктуру наплавленого металу, яка складається з полігонального фериту, невеликої кількості поліедричного фериту по границях литих кристалітів (рис. 5.10). У структурі ж самих кристалітів спостерігається певні відмінності: у зразка, що наплавлений зі швидкістю $V_n = 0,005$ м/с, у центрі кристалітів спостерігається феритно-карбідна суміш, а у зразка, що наплавлений зі швидкістю $V_n = 0,0072$ м/с – голчастий ферит. Мікроструктура ДВЗ ЗТВ обох цих зразків складається із суміші фериту та сорбітоподібного перліту.

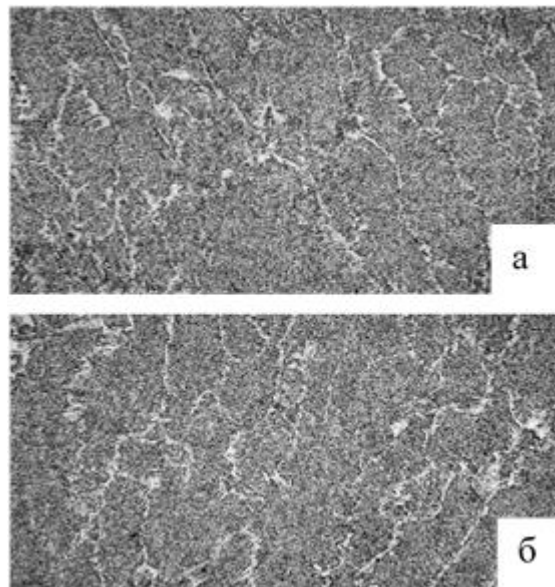


Рисунок 5.10 – Характерна мікроструктура зразків ($\times 200$), що наплавлені на режимах: а – $I_n = 175,0$ А, $V_n = 0,005$ м/с, $A = 0,005$ м, $\nu = 3,5$ Гц;

б – $I_n = 175,0$ А, $V_n = 0,0072$ м/с, $A = 0,007$ м, $\nu = 4,5$ Гц

З аналізу зразків, що отримані при наплавленні за струмом $I_n = 175,0$ А, витікає, що на низьких швидкостях наплавлення $0,0028$ м/с та $0,0039$ м/с та низьких значеннях параметрів коливань мікроструктура хоча і має певні структурні відмінності, але принципово не відрізняється від зразку, що отриманий без впливу коливань. При більш високій швидкості наплавлення – $0,0061$ м/с та амплітудно-частотних параметрів коливань склад мікроструктури теж принципово не змінюється, але суттєво збільшується ступінь її диспергування. При збільшенні як

швидкості наплавлення, так і параметрів коливань, формуються такі корисні складові мікроструктури, як феритно-карбідна суміш та голчастий ферит. Тобто, при даній силі струму наплавлення збільшення швидкості наплавлення та параметрів коливань є ефективним засобом покращити мікроструктуру за рахунок створення відповідних структурних складових, їх співвідношення та збільшення ступеню диспергування. Відманштетова структура не спостерігалась у зразках, що отримані з використанням коливань.

Зразки, що наплавлені при силі струму наплавлення 200,0 А.

Зразок, що наплавлений без впливу коливань за режимом $I_n = 200,0$ А, $V_n = 0,0072$ м/с, має мікроструктуру наплавленого металу, що складається з фериту та перліту, а також тонкими виділеннями полігонального фериту та зернами поліедричного фериту у невеликій кількості, є ділянки з відманштетовою структурою. Мікроструктура ДВЗ ЗТВ є феритно-перлітною (рис. 5.11).



Рисунок 5.11 – Характерна мікроструктура зразку ($\times 200$), що наплавлений за режимом $I_n = 200,0$ А, $V_n = 0,0072$ м/с без впливу коливань

Застосування коливань з низькою частотою у 2,5 Гц та досить великою амплітудою у 0,005 м, але при низькій швидкості наплавлення у 0,0028 м/с, вже створює умови для формування в мікроструктурі голчастого фериту, але з досить крупним розміром. У ЗТВ при цьому зберігається феритно-перлітна структура, але вміст перлітної складової збільшується (рис. 5.12, а).

Збільшення швидкості до 0,0039 м/с та частоти коливань до 4,5 Гц з незначним зменшенням амплітуди призводить до формування у центрі кристалітів дрібноголчастого фериту, при цьому полігональний та поліедричний ферит виділяється по границям литих кристалітів, а у структурі ДВЗ ЗТВ разом з феритом

формується сорбітоподібний перліт (рис. 5.12, б). Підвищення швидкості наплавлення до 0,0061 м/с, амплітуди коливань до 0,007 м при зменшенні частоти до 3,0 Гц - 3,5 Гц призводить до формування великої кількості полігонального та поліедричного фериту по границях литих кристалітів, а в центрі кристалітів формується голчастий ферит.

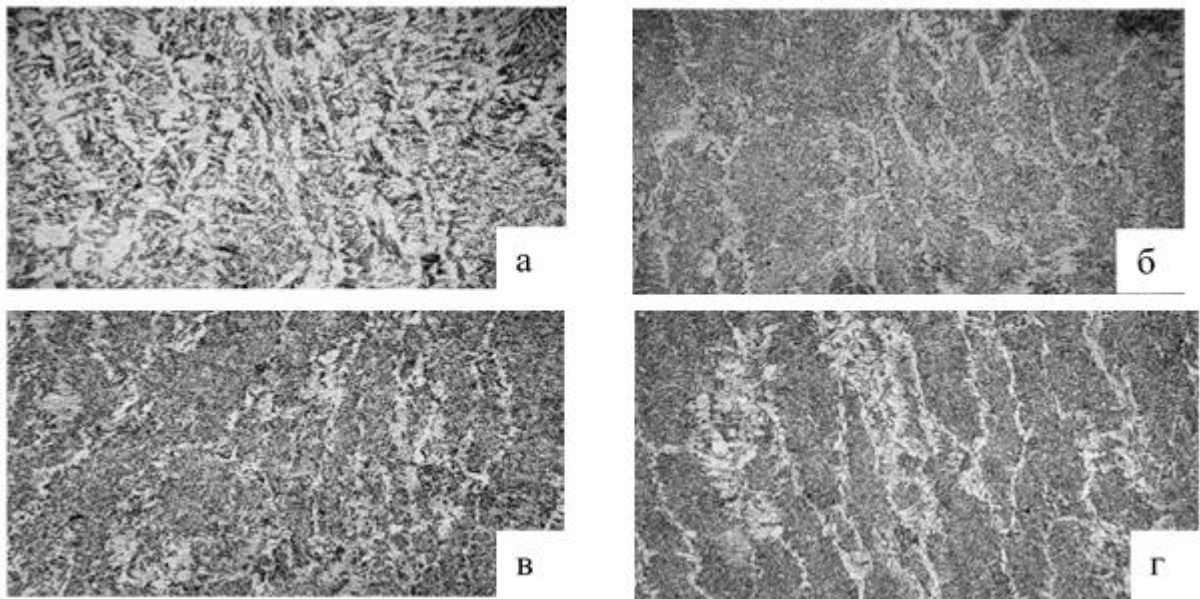


Рисунок 5.12 – Характерна мікроструктура зразків ($\times 200$), що наплавлені за режимами: а – $I_n = 200,0$ А, $V_n = 0,028$ м/с, $A = 0,005$ м, $\nu = 2,5$ Гц;
 б – $I_n = 200,0$ А, $V_n = 0,0039$ м/с, $A = 0,004$ м, $\nu = 4,5$ Гц;
 в – $I_n = 200,0$ А, $V_n = 0,005$ м/с, $A = 0,006$ м, $\nu = 3,0$ Гц;
 г – $I_n = 200,0$ А, $V_n = 0,0072$ м/с, $A = 0,003$ м, $\nu = 4,0$ Гц

У ДВЗ ЗТВ мікроструктура залишається феритно-перлітною (рис. 5.12, в). Збільшення швидкості до 0,0072 м/с при зменшенні амплітуди до 0,003 м та за досить високого значення частоти у 4,0 Гц призводить до формування мікроструктури, що складається з класичного голчастого фериту, тонких виділень полігонального фериту та досить великих скупчень поліедричного фериту (рис. 5.12, г), що значно знижує твердість. Окрім того у мікроструктурі ДВЗ ЗТВ, яка залишається феритно-перлітною, формується відманштетова структура.

З опису витікає, що зростання швидкості наплавлення, амплітуди та частоти коливань створюють умови щодо формування різних форм голчастого фериту та збільшення його складової у загальній мікроструктурі. Зменшення амплітуди за досить високих значень частоти та швидкості наплавлення призводить до формування класичного голчастого фериту, але разом з цим формує досить велику кількість небажаної структурної складової – поліедричного фериту. З іншого ж боку, за низьких значень швидкості наплавлення і частоти та досить високому значенні амплітуди голчастий ферит формується, але з досить великим розміром, у той час як поліедричний ферит – ні. Вплив коливань на мікроструктуру ЗТВ є опосередкованим й вона залишається в основному феритно-перлітною. Відманштетова структура у зразках, що отримані з використанням коливань, не спостерігалась.

5.4 Модифікування мікроструктури наплавленого металу під впливом коливань даного типу

Особливістю формування мікроструктури наплавленого металу у діапазоні струмів від 100,0 А до 200,0 А під впливом коливань даного типу є формування феритного типу її з різними формами морфології: поліедричної, голчастої та переважно пластинчатої з феритними оторочками по границям зерен-кристалітів. Такий тип мікроструктури наплавленого металу якісно відрізняється від зразків, що отримані без такого коливального впливу і які мали феритно-перлітну структуру у діапазоні струмів від 100,0 А до 125,0 А та феритну з вищевказаними формами морфології, а також такими складовими її, як полігональний ферит та перліт у діапазоні струмів від 150,0 А до 200,0 А, що негативно впливає на величину твердості наплавленого металу. Таким чином, формування у наплавленому металі під впливом коливань даного типу феритної мікроструктури пластинчатого типу у діапазоні струмів наплавлення від 100,0 до 200,0 А та швидкості наплавлення від 0,0028 м/с до 0,0072 м/с з формуванням кристалітів середнім розміром від 20,0 мкм до 50,0 мкм, що досягається у діапазоні струмів наплавлення від 100, 0 А до 175,0 А

та швидкості наплавлення у діапазоні від 0,0028 м/с до 0,0061 м/с, сприяло отриманню максимального значення твердості наплавленого металу на рівні 2500,0 МПа - 2700,0 МПа у діапазоні струму наплавлення від 100,0 А до 150,0 А та швидкості наплавлення від 0,0061 м/с до 0,0072 м/с.

Позитивний вплив коливань на формування мікроструктури ЗТВ основного металу прослідковується у переході від класичної феритно-перлітної структури до більш дисперсійних форм – таких як пластинчатий ферит і пластинчатий та сорбітоподібний перліт при режимах із зміною струму наплавлення у діапазоні від 100,0 А до 125,0 А і швидкості наплавлення від 0,005 м/с до 0,0072 м/с.

Застосування коливань даного типу дозволяє суттєво знизити або взагалі позбутися відманштетової складової, що формується у мікроструктурі наплавленого металу за режимами зі струмом наплавлення у діапазоні від 150,0 А до 200,0 А, а також у ДВЗ ЗТВ основного металу за силою струму наплавлення у 200,0 А за відсутністю коливань та на деяких режимах з коливаннями частотою 2,5 Гц у зазначеному діапазоні струмів наплавлення. З підвищенням частоти коливань відманштетова складова майже або зовсім зникає, що обумовлено суттєвим зниженням погонної енергії від 16,8 рази до 27,5 рази.

Загалом позитивний вплив коливань за діапазоном струму наплавлення від 100,0 А до 200,0 А полягає у зменшенні товщини феритних оторочок (табл. 5.3) між зернами мікроструктури наплавленого металу та ЗТВ основного металу та формуванні в середині зерна більш високодисперсної феритної структури, що найчастіше досягається за наступних діапазонів амплітудно-частотних параметрів коливань даного типу: частота 2,5 Гц - 3,0 Гц, амплітуда 0,005 м - 0,007 м; частота 4,0 Гц - 4,5 Гц, амплітуда 0,003 м - 0,005 м.

5.5 Впровадження результатів досліджень

Метод покращення мікроструктури наплавленого металу, що досліджується у даній дисертації, був впроваджений при відновленні робочих поверхонь опорних плит гідравлічних пресів, що використовуються у поліграфічному виробництві для

обтискання книжних блоків, брошур, постерів та інших поліграфічних виробів (рис. 5.13). Матеріалом, що підлягає обтисканню, окрім паперу, є натуральна та штучна шкіра, пластик, тканина та фольга. Плити, де відбувається обтиск, зазвичай мають розмір до 330,0 мм × 440,0 мм × 10,0 мм. Зусилля притиску плит є від 400,0 кг до 5000,0 кг, робоча температура від 0 °С до 350,0 °С. Матеріал плит є Ст3, Ст15, Ст20. Основним видом дефекту таких плит є порушення площинності (рис. 5.14), який виправляється шліфуванням такої поверхні до гладкого стану або сточуванням верхнього шару металу плити у випадку глибоких дефектів її поверхні.



Рис. 5.13 – Загальний вигляд пресу та опорних плит

Після 5 - 6 циклів ремонтної механічної обробки опорна плита втрачає необхідну товщину і, з огляду на конструктивні особливості преса (обмеження робочого ходу приводу), не може забезпечувати достатню величину зусилля притиску при експлуатації через збільшення відстані між плитами, що і обумовлює зниження значення зусилля.



Рис. 5.14 – Загальний вигляд дефектів на поверхні пластин: а – верхньої, б – нижньої, в – на направляючих

З огляду на те, що таке обладнання здебільшого є імпортом, придбання комплекту нових плит є достатньо затратним і може складати від 15,0 % до 35,0 % від вартості пресу. Окрім того, тривалий час доставки цих комплектуючих негативно впливає на графік роботи поліграфічного виробництва. Таким чином, актуальною задачею є відновлення робочих поверхонь опорних плит електродуговим наплавленням з низькою собівартістю, обмеженим тепловкладенням у виріб через товщину плити у 10,0 мм - 20,0 мм, з можливістю

нанесення шару наплавленого металу товщиною від 3,0 мм до 4,0 мм з достатньо високою продуктивністю.

Вибір технологічного газу щодо захисту зони дуги також обумовлено якомога більшим зниженням собівартості процесу відновлення, тому для даного типу основного металу плит (СтЗсп) було обрано вуглекислий газ, а у якості електродного дроту – низьколегований дріт типу Св-08Г2С (*ER70S-6*). Для здійснення наплавлення з можливістю покращення службових характеристик наплавленого металу (твердість) застосовувався стенд, схема якого наведений на рисунку 14, а опис – у главі 2 даної дисертаційної роботи. Послідовність відновлення плити була наступна:

- оглядають деталь і зачищають поверхню, що буде наплавлятися, від масла, іржі і бруду до металевого блиску; зачистка поверхні здійснювалась прямошліфувальною машиною з дротяною щіткою;
- деталь розрізається навпіл: кожна частина мала розмір 165,0 мм × 440,0 мм × 10,0 мм;
- обидві частини пластини піддаються рекристалізаційному відпалу у печі за режимом: швидкість нагріву – 12,0 °С/хв., температура витримки – 620,0 °С, витримка – 30,0 хв, час охолодження – 6,0 годин;
- для запобігання короблення, деталь приварюється по периметру до технологічної сталеваної пластини товщиною 8,0 мм ручним дуговим зварюванням за струму 200,0 А - 250,0 А електродами марки МР-3 діаметром 5,0 мм. Таким чином, загальна товщина закріпленої на рухомому столі деталі сягала 18,0 мм;
- деталь закріплюється на рухомому столі та затискається по периметру мідними накладками товщиною 12,0 мм для запобігання стікання рідкого металу (висота мідних накладок була 25,0 мм (рис. 5.15));
- після наплавлення одного валику деталь охолоджувалась до кімнатної температури;

- наплавлення здійснюється по всій площі деталі. Вздовж лінії різку наплавлення не здійснюється;
- після наплавлення деталь відокремлювалась від технологічної підкладки за допомогою прямошліфувальної машини з відрізним абразивним диском;
- відновлені частини опорної плити зварюються ручним дуговим зварюванням за струму 200,0 А - 250,0 А електродами марки МР-3 діаметром 5,0 мм по лінії різку. Перед зварюванням обидві деталі жорстко закріплюються у притискному технологічному пристрої.

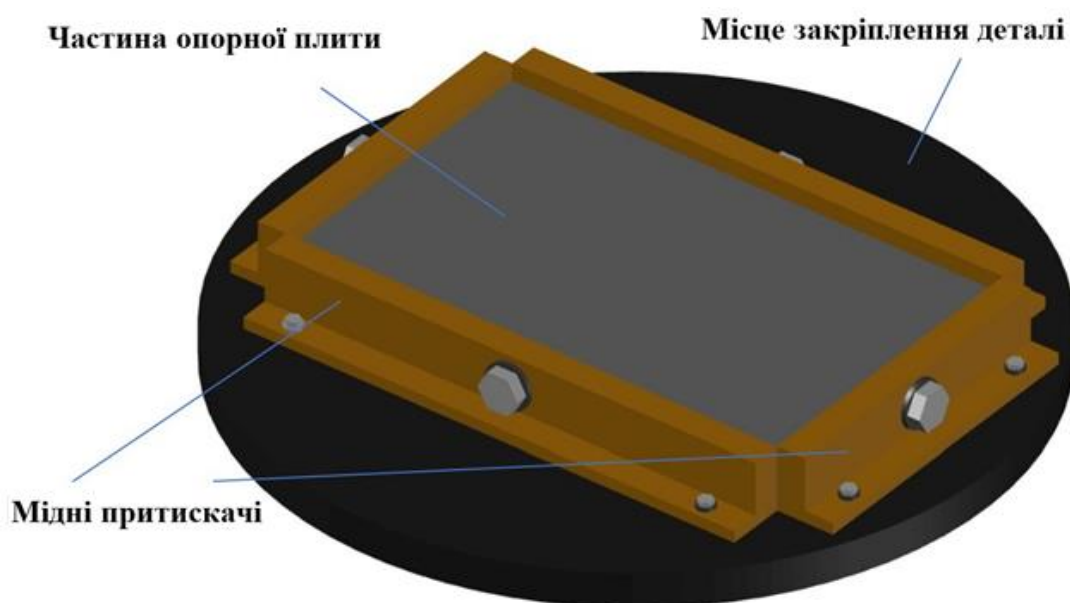


Рис. 5.15 – Загальна схема закріплення частини опорної плити для наплавлення із запобіганням розтікання рідкого металу з використанням мідних притискачів

Техніка наплавлення валиків на поверхню пластини здійснювалось за описаним в розділі 2 методом за наступним технологічним режимом: $I_n = 100,0$ А, $V_n = 0,0072$ м/с, $\nu = 2,5$ Гц, $A = 0,007$ м з рекомендованою величиною перекриття валиків по ширині в межах від $1/3$ [45] ширини валика до $1/2$ [123] ширини валика (рис. 5.16).

Дослідження зразків-свідків показали, що мікроструктура і твердість відповідає дослідному зразку, отриманому за режимом $I_n = 125,0$ А, $V_n = 0,0072$ м/с, $\nu = 2,5$ Гц, $A = 0,006$ м. Після механічної обробки товщина наплавленого шару

склала 1,8 мм, що відповідало 2-м міжремонтним циклам роботи з проміжною переточкою.



Рис. 5.16 – Загальний вигляд опорної плити після наплавлення та зварювання

Замовник провів вимірювання твердості відновленої поверхні плити переносним твердоміром моделі ТКР-35 фірми «Ультракон» (контактно-резонансного типу). Результати цього вимірювання склали 2500,0 МПа - 2600,0 МПа, що збігалось з вимірами твердості на зазначеному дослідному зразку, отриманому за оптимальним режимом наплавлення та на поперечних шліфах, вирізаних з зразків-свідків.

5.6 Висновки до розділу 5

1. За експериментальними даними та за контурними графіками встановлено, що мінімальне значення розміру кристаліту у діапазоні від 20,0 мкм до 70,0 мкм (клас зерна 5,6) найчастіше формується за діапазонами значень частот від 2,5 Гц до 3,0 Гц з амплітудою в межах від 0,004 м - 0,007 м та за 4,0 Гц - 4,5 Гц з амплітудою в межах від 0,003 м до 0,006 м в залежності від співвідношення сили струму I_n та швидкості наплавлення V_n . Однак, за режимами наплавлення з силою струму в межах 100,0 А - 150,0 А та за швидкості

наплавлення у 0,0072 м/с спостерігається формування мінімального значення розміру кристаліту на рівні до 60,0 мкм за всім діапазоном частот з амплітудою у межах від 0,003 м до 0,006 м.

2. Встановлено, що у порівнянні із зразками, отриманими без коливального впливу за аналогічних технологічних режимів, можливо у діапазоні значень сили струму наплавлення від 100,0 А до 175,0 А завдяки застосуванню коливань зменшити розмір зерна від 2,8 рази до 6,1 рази, однак при наплавленні з силою струму наплавлення у 200,0 А розмір зерна може збільшуватись саме завдяки коливанням.
3. Встановлено, що за характером впливу коливань зв'язок між розміром кристаліту та величиною твердості наплавленого металу має дві складові: ступень диспергування мікроструктури; твердість структурних складових мікроструктури. Домінування тієї чи іншої складової або сумісний їх вплив визначає величину твердості. Можливість впливу на мікроструктуру завдяки коливанням на ту чи іншу складову або їх сумісний вплив визначають фактори струму та швидкості наплавлення.
4. Визначені типи структурних складових, що сприяють підвищенню твердості: голчастий та пластинчатий ферит – формуються не тільки у середині литих кристалітів, але й по їх границям. Мікроструктура металу ЗТВ покращується під впливом коливань завдяки формуванню в ній пластинчатого фериту та збільшенню долі сорбітоподібного перліту.
5. Встановлена загальна тенденція: найкращий вплив на мікроструктуру відбувається з підвищенням технологічних параметрів режиму, особливо швидкості наплавлення, із збільшенням амплітуди й одночасним зменшенням частоти. Визначено, що найкраща структура наплавленого металу отримана за технологічного режиму $I_n = 125,0$ А, $V_n = 0,0072$ м/с, $A = 0,006$ м, $\nu = 2,5$ Гц і являє собою суміш верхнього та нижнього бейніту, а мікроструктура в ДВЗ ЗТВ основного металу є мартенситно-бейнітною.

6. Встановлено, що завдяки зниженню погонної енергії від 16,8 рази до 27,5 рази при наплавленні під впливом коливань даного типу у порівнянні з режимами без такого впливу у діапазоні струмів від 100,0 А до 200,0 А та швидкостей наплавлення від 0,0028 м/с - 0,0072 м/с відбувається модифікування мікроструктури як наплавленого металу, так і ЗТВ основного металу. Цей ефект полягає у зменшенні товщини феритних прошарків між зернами мікроструктури наплавленого металу та ЗТВ основного металу, формуванні в середині зерна більш високодисперсної феритної структури з середнім розміром кристаліту 20,0 мкм - 50,0 мкм (бал зерна 5,6), суттєвому зменшенні та зникненні відманштетової складової мікроструктури. Максимальний ефект найчастіше досягається за наступних діапазонів амплітудно-частотних параметрів коливань даного типу: частота 2,5 Гц - 3,0 Гц, амплітуда 0,005 м - 0,007 м; частота 4,0 Гц - 4,5 Гц, амплітуда 0,003 м - 0,005 м у комбінації із струмом наплавлення за діапазоном від 100,0 А до 150,0 А, швидкості наплавлення від 0,0061 м/с - 0,0072 м/с, за яких забезпечується максимальне значення твердості наплавленого металу в межах 2500,0 МПа - 2700,0 МПа.
7. Встановлено, що найбільш ефективно зменшення феритної оторочки під впливом коливань (4,0 мкм - 14,0 мкм) відбувається за струму наплавлення від 100,0 А до 150,0 А та швидкості наплавлення від 0,0061 м/с - 0,0072 м/с за частоти коливань в межах від 2,5 Гц до 3,5 Гц та амплітуди – від 0,004 м до 0,006 м. Без коливального впливу у даному діапазоні струмів наплавлення розмір феритної оторочки знаходиться в межах від 23,0 мкм до 32,0 мкм. За струмом наплавлення в межах від 175,0 А до 200,0 А вплив коливань має негативний ефект щодо розміру феритної оторочки (5,0 мкм - 9,0 мкм) у порівнянні з режимами без коливального впливу (9,0 мкм - 33,0 мкм), що обумовлено збільшенням значення миттєвої швидкості охолодження у порівнянні з режимами наплавлення без впливу коливань.

8. Результати технологічних досліджень способу впливу низькочастотних механічних коливань пласкої деталі на структуру та властивості наплавленого дуговим методом металу були запроваджені при відновленні поверхонь опорних плит гідравлічних пресів, що використовуються для палітурних робіт в поліграфічному виробництві.
9. Відновлені плити знаходяться в дослідній експлуатації, рекламацій від замовника не надходило, можна попередньо стверджувати, що стійкість плит як мінімум не поступається оригінальним деталям. Отримано відповідний акт дослідно-промислового впровадження технології дугового наплавлення в CO_2 із застосуванням способу впливу низькочастотних механічних коливань пласкої деталі на структуру та властивості наплавленого металу.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Удосконалено технологію дугового наплавлення плавким електродом в CO_2 з використанням механічних низькочастотних коливань деталі, що наплавляється. Запропоновано даний тип коливань здійснювати за траєкторією дуги окружності, що відрізняє їх від інших типів механічного періодичного впливу задіяних у інших дослідженнях. Наплавлення здійснювалось зварювальним суцільним дротом діаметром 1,2 мм типу Св-08Г2С. Даним способом вдалось зменшити висоту валику від 1,2 рази до 6,4 рази, а глибину проплавлення у 2,0 рази, збільшити ширину наплавленого металу від 1,3 рази до 1,8 рази у порівнянні з наплавленням за аналогічних технологічних режимів без коливань.
2. Розроблено конструкцію дослідно-промислового обладнання для дугового наплавлення з використанням механічних низькочастотних гармонійних коливань зварювального виробу, що здійснюються за траєкторією дуги окружності з частотою у діапазоні від 2,5 Гц до 4,5 Гц та амплітудою – від 3,0 мм - 7,0 мм.
3. На підставі обробки емпіричних даних методами регресійного аналізу на основі повнофакторного експерименту за планом експерименту «латинський квадрат» розроблено математичні моделі у вигляді поліномів другого та третього ступенів, адекватні за діапазонів струму наплавлення від 100,0 А до 200,0 А, швидкості наплавлення від 10,0 м/год до 26,0 м/год, частоти коливань від 2,5 Гц до 4,5 Гц, амплітуди коливань від 3,0 мм до 7,0 мм.
4. Встановлено, що твердість наплавленого металу можна збільшити від 3,0 % до 53,0 %, металу ЗТВ від 27,0 % до 144,0 % у порівнянні з аналогічними технологічними режимами наплавлення без коливань. Встановлено оптимальний, за критеріями твердості наплавленого металу і оптимальних значень геометричних розмірів наплавлених валиків, режим наплавлення: струм наплавлення 100,0 А, швидкість наплавлення 26 м/год, частота коливань 2,5 Гц, амплітуда коливань 7,0 мм.

5. Встановлена можливість збільшення диспергування мікроструктури наплавленого металу за рахунок впливу коливань даного типу. Методами регресійного аналізу показано, що зменшити розмір кристаліту можливо в діапазоні від 2,8 рази до 6,1 рази (20,0 мкм - 30,0 мкм – клас зерна 5,6 за ДСТУ 8972:2019), а розмір феритних прошарків – від 1,64 рази до 8,0 разів (4,0 мкм - 14,0 мкм) у порівнянні із зразками, що отримані без коливального впливу (розмір кристаліту приблизно 70,0 мкм - 180,0 мкм – клас зерна 1-4; розмір феритних прошарків – 23,0 мкм - 32,0 мкм). Інші розповсюджені способи отримання наплавленого металу типу 08Г2С забезпечують ступень диспергування на рівні 30,0 мкм - 80,0 мкм (клас зерна 4 - 6), що більше від розміру зерна наплавленого металу, отриманого способом, що досліджується у даній дисертаційній роботі від 1,5 рази до 2,7 рази.

6. Встановлені основні типи структурних складових мікроструктури, що сприяють підвищенню твердості на рівні від 2500,0 МПа до 2700,0 МПа: голчастий, пластинчатий ферит в наплавленому металі, а у металі ЗТВ – на рівні від 2500,0 МПа до 3200,0 МПа: пластинчатий ферит та сорбітоподібний перліт. Мікроструктура, що відповідала зразку з максимальним значенням твердості у 2700,0 МПа є суміш верхнього та нижнього бейніту у наплавленому металі, а у металі ЗТВ мікроструктура є мартинситно-бейнітна.

7. Встановлена загальна тенденція: найбільш ефективний вплив на мікроструктуру відбувається за підвищення технологічних параметрів режиму: сили струму та, особливо, швидкості наплавлення із збільшенням амплітуди й одночасним зменшенням частоти, що суттєво знижує вклад питомої енергії під час наплавлення в межах від 9,726 кДж до 97,529 кДж/м в порівнянні з режимами без впливу коливань – від 267,0 кДж/м до 1640,0 кДж/м, що засвідчує зниження теплового впливу на основний метал від 16,8 рази до 27,5 рази.

8. Встановлено вплив коливань на величину часу горіння дуги, що характеризує частоту перенесення електродного металу в зварювальну ванну. Показано, що за частоти у 4,5 Гц час горіння дуги збільшується приблизно на 45,0 % за амплітуди

3,0 мм та на 63,0 % за амплітуди у 7,0 мм. Розроблено математичну модель, що дозволяє оцінити величину періоду горіння дуги в залежності від параметрів коливань.

9. На підставі результатів технологічних досліджень дугового наплавлення з низькочастотними коливаннями означеного типу пласкої деталі на структуру та властивості наплавленого металу, було запроваджено технологію відновлення поверхонь опорних плит гідравлічних пресів. Відновлені плити знаходяться в дослідній експлуатації на підставі чого можна вважати задовільною стійкість плит відносно оригінальних деталей. Підготовлено відповідний акт впровадження даної технології наплавлення.

10. За результатами дослідно-практичних робіт за тематикою дисертаційної роботи у співавторстві отримано 3 Патенти України на корисну модель: "Спосіб електродугового наплавлення з керуванням формою поверхні валика" (№ 120877), "Установка для автоматичного дугового наплавлення зовнішніх поверхонь деталей обертання" (№ 112270), "Спосіб забезпечення суцільності шару, наплавленого електродуговим зварюванням по гвинтовій лінії" (№ 113943).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Чернов Д. К. Критический обзор статей гг. Лаврова и Калакуцкого о стали и стальных орудиях и собственные Д. К. Чернова исследования по этому же предмету. *Записки императорского Русского технического общества*. 1868. №7, С. 339-440.
- [2] Морозов В. П. Анализ условий формирования измельчённой структуры при кристаллизации металла сварочной ванны с наложением внешних периодических возмущений. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2006. № 8, С. 41-54.
- [3] Прохоров Н. Н. Технологическая прочность металлов при сварке. Москва: Общественный университет ЦП НТО МАШПРОМ, 1960. 59 с.
- [4] Болдырев А. М., Дорофеев Э. Б., Антонов Е. Г. Управление кристаллизацией металла при сварке плавлением. *Сварочное производство*. 1971. №6, С. 35-37.
- [5] Чалмерс Б. Теория затвердевания. Москва: Металлургия, 1968. 288 с.
- [6] Тиллер В. А. Многофазная кристаллизация: В кн. Жидкие металлы и их затвердевания. Москва: Металлургиздат, 1962. С. 307-354.
- [7] Болдырев А. М. О механизме формирования структуры металла шва при введении низкочастотных колебаний в сварочную ванну. *Сварочное производство*. 1976. №2, С. 52-55.
- [8] Seeman H. J., Staats H., Georg K. G. Verfahren zur Schwingungsbehandlung von Metall- und Stahlschmelzen unter besonderer Berücksichtigung der Kornfeinung durch Erstarrungsbeschallung. *Archiv für das Eisenhüttenwesen*. 1967. No 4 (38), P.257-265. <https://doi.org/10.1002/srin.196704180>
- [9] Schmid G., Roll A. Die Wirkung intensiven Schalls auf Metallschmelzen. II. Die Bedeutung der Frequenz und Intensität des Schalls für die Kornverfeinerung. *Zeitschrift für Elektrochemie und angewandte physikalische Chemie*. 1939. No 10 (45), P. 769-775. <https://doi.org/10.1002/bbpc.19390451005>

- [10] Ландау А. И. К вопросу о волнообразном характере распределения примеси вдоль длины растущего монокристалла. *Физика металлов и металловедение*. 1958. № 1 (6), С. 148-156.
- [11] Славин Г. А. Формирование дезориентированной структуры металла шва при наложении низкочастотных возмущений на сварочную ванну. *Сварочное производство*. 1980. №6, С. 3-5.
- [12] Сутырин Г. В. Исследование механизма воздействия низкочастотной вибрации на кристаллизацию сварочной ванны. *Автоматическая сварка*. 1975. №5, С. 7-10.
- [13] Якушин Б. Ф., Мисюров А. И. Повышение технологической прочности швов при сварке среднелегированной стали с электромагнитным воздействием. *Сварочное производство*. 1979. №12, С. 7-9.
- [14] Жданов Г. С. Физика твёрдого тела. Москва: МГУ, 1962. 504 с.
- [15] Абралов М. А., Абдурахманов Р. У. О механизме измельчения первичной структуры металла сварного шва при электромагнитном воздействии. *Автоматическая сварка*. 1982. №2, С. 18-21.
- [16] Аристов С. В., Руссо В. Л. Кристаллизация металла шва при низкочастотных колебаниях расплава. *Сварочное производство*. 1982. №11, С. 42-44.
- [17] Семенюк Н. И., Рабкин Д. М., Лозовская А. В. Характер изменения температуры алюминия в процессе затвердевания при сварке плавлением. *Автоматическая сварка*. 1986. №9, С. 22-24.
- [18] Оно А. Затвердевание металлов. Москва: Металлургия, 1980. 152 с.
- [19] М. Флемингс, *Процессы затвердевания*. Москва: Мир, 1977. 423 с.
- [20] Семенюк Н. И., Рабкин Д. М. Измельчение первичной структуры металла швов на алюминиевых сплавах с помощью локального импульсного подогрева. *Автоматическая сварка*. 1989. №6, С. 7-12.
- [21] Тюменцев И. Г. Исследование влияния продольного магнитного поля при сварке на характер кристаллизации и прочность металла шва: дис. ... канд. техн. наук, Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1978. 227 с.

- [22] Черныш В. П., Кузнецов В. Д. Сопrotивляемость горячим трещинам металла швов, кристаллизующихся в условиях перемешивания. *Сварочное производство*. 1971. №6, С. 41-42.
- [23] Малинкин И. В., Черныш В. П. Выбор режима электромагнитного перемешивания сварочной ванны. *Автоматическая сварка*. 1970. №7, С. 14 - 16.
- [24] Алов А. А., Виноградов В. С. Повышение качества металла сварных швов. *Сварочное производство*. 1957. №7, С. 9-10.
- [25] Алов А. А., Виноградов В. С. Влияние вибрации электрода на процесс дуговой сварки и свойства швов. *Сварочное производство*. 1958. №9, С. 19-22.
- [26] Макара А. М., Кушниренко Б. Н. Поперечные перемещения дуги как фактор улучшения структуры и свойств сварных соединений. *Автоматическая сварка*. 1967. №1, С. 31-35.
- [27] Морозов В. П. Определение связи между периодичностью процесса кристаллизации металла сварного шва, изменениями мгновенной скорости затвердевания и показателями технологической прочности. *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*. 2010. №9, 13 с.
- [28] Морозов В. П. Влияние колебательного механизма кристаллизации на процесс измельчения первичной структуры металла шва и зоны термического влияния. *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*. 2010. №9, 17 с.
- [29] Сараев Ю. Н., Лебедев В. А., Новиков С. В. Анализ существующих методов управления структурой металла сварного шва. *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. 2016. № 1 (4), С. 16-26.
- [30] Рыжов Р. Н. Влияние импульсных электромагнитных воздействий на формирование и кристаллизацию швов. *Автоматическая сварка*. 2007. №2, С. 56-58.

- [31] Размышляев А. Д., Агеева М. В., Бган С. А. Сравнение эффективности продольных и поперечных магнитных полей при дуговой сварке и наплавке. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*. 2019. №1, С. 55-60.
- [32] Subravel V., Padmanaban G., Balasubramanian V. Optimizing the magnetic arc oscillation process parameters to attain maximum tensile strength using RSM. *Journal of Manufacturing Engineering*. 2017. No 1 (12), P. 49-54.
- [33] Bai W., Zhang D., Yin H. Y., Wang K. Effect of longitudinal magnetic field on grain growth of hollow stud welded joint. *Research Square*. 2021. 8 p. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-896157/v1>
- [34] Natividad C., García R., López V. H., Contreras A., Salazar M. Metallurgical characterization of API X65 steel joint welded by MIG welding process with axial magnetic field. *Materials Research*. 2017. No 5 (20), P. 1174-1178. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2016-0182>
- [35] de Queiroz A.V., Fernandes M. T., Silva L., Demarque R., Xavier C. R., de Castro J. A. Effects of an external magnetic field on the microstructural and mechanical properties of the fusion zone in TIG welding. *Metals*. 2020. No 6 (10), 714, 15 p. <https://doi.org/10.3390/met10060714>
- [36] Curiel F. F., García R., López V. H., García M. A., Contreras A., García M. A. The Effect of applying magnetic fields during welding AISI-304 stainless steel on stress corrosion cracking. *Int. J. Electrochem. Sci*. 2021. No 3 (16), 20 p. <https://doi.org/10.20964/2021.03.31>
- [37] CheLah N., Hussin M. H. Magnetic field effects on 4G positions in shielded metal arc welding process. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*. 2020. No 3 (9), P. 694-703. <https://doi.org/10.35940/ijeat.B3102.029320>
- [38] Морозов В. П. Влияние внешнего пульсирующего источника тепла на расплавленный металл сварного шва в процессе его кристаллизации с целью эффективного управления структурообразованием. *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*. 2010. №10, 22 с.

- [39] Maruo H., Hirata Y. Bead formation in pulsed TIG welding. *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*. 1985. No 2 (3), P. 253-260. <https://doi.org/10.2207/qjws.3.253>
- [40] Столпнер Е. А., Славин Г. А. Методика определения динамического давления импульсной дуги. *Сварочное производство*. 1971. №9, С. 8-10.
- [41] Славин Г. А., Столпнер Е. А., Морозова Т. В., Маслова Н. Д., Хорошева В. Б. Управление процессом кристаллизации путём динамического воздействия дуги. *Сварочное производство*. 1974. №8, С. 2-3.
- [42] Липодаев В. Н., Снисарь В. В., Елагин В. П., Сидорук В. С., Гордань, А. Ф. Цвигун Г. Н. Влияние модуляции сварочного тока на структуру и трещиностойкость высоколегированных аустенитных швов. *Автоматическая сварка*. 1991. №2, С. 22-26.
- [43] Завдовеев А. В., Позняков В. Д., Rogante M., Жданов С. Л., Костин В. А., Соломийчук Т. Г. Особливості формування структури і властивості з'єднань сталі S460M, виконаних імпульсно-дуговим зварюванням. *Автоматичне зварювання*. 2020. №6, С. 11-16. <https://doi.org/10.37434/as2020.06.02>
- [44] Пантелеенко Ф. И., Лялякин В. П., Иванов В. П., Константинов В. М. Восстановление деталей машин: справочник. Москва: Машиностроение, 2003. 672 с.
- [45] Карокозов Э. С., Мустафеев Р. И. Справочник молодого электросварщика. Москва: Высшая Школа, 1992. 304 с.
- [46] Вощанов К. П. Ремонт оборудования сваркой. Москва: Машиностроение, 1967. 192 с.
- [47] Лебедев В. А., Лендел И. В., Яровицын А. В., Лось Е. И., Драган С. В. Особенности формирования структуры сварных соединений при дуговой наплавке с импульсной подачей электродной проволоки. *Автоматическая сварка*. 2016. №3, С. 25-30. <https://doi.org/10.15407/as2016.03.03>
- [48] Сараев Ю. Н., Голиков Н. И., Дмитриев В. В., Санников И. И., Безбородов В. П., Григорьева А. А. Исследование влияния адаптивной импульсно-дуговой

- сварки на механические свойства и остаточные напряжения сварных соединений стали марки 09Г2С. *Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)*. 2013. №3, С. 19-24.
- [49] Зарипов М. З., Ибрагимов И. Г., Ризванов Р. Г., Файрушин А. М., Мухаметзянов З. Р. Исследование влияния вибрационных и ультразвуковых колебаний в процессе сварки на свойства сварных соединений нефтегазового оборудования из стали 12Х18Н10Т. *Сетевое издание «Нефтегазовое дело»*. 2010. № 2, 12 с.
- [50] Салмин А. Н., Файрушин А. М., Ибрагимов И. Г. Исследование влияния вибрационных колебаний в процессе сварки на технологическую прочность и механические свойства сварных соединений из стали 11Х11Н2В2МФ. *Сетевое издание «Нефтегазовое дело»*. 2010. № 2, 8 с.
- [51] Selvi A. A. Effect of linear direction oscillation on grain refinement: thesis of the requirements for the degree Master of Science in the Graduate School: graduate program “Mechanical Engineering”. Ohio: State University, 2014. 45 p.
- [52] Bade V. S., Rao P. S., Rao P. G. Experimental investigation on influence of electrode vibrations on hardness and microstructure of 1018 mild steel weldments. *World Journal of Engineering*. 2020. No 4 (17), P. 509-517. <https://doi.org/10.1108/WJE-11-2019-0333>
- [53] Tamasgavabari R., Ebrahimi A., Abbasi S. M., Yazdipour A. Effect of harmonic vibration on microstructure and mechanical properties of AA-5083-H321 aluminum alloy GMAW welds. *Journal of Welding Science and Technology of Iran*. 2019. No 1 (5), P. 133-145.
- [54] Rao M. V., Rao P. S., Rao P. G. Influence of transverse vibrations on the fatigue life of aluminum alloy weld connections. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*. 2020. No 1 (10), P. 1353-1358.
- [55] Hsieh C. C., Wang P. S., Wang J. S., Wu W. Evolution of microstructure and residual stress under various vibration modes in 304 stainless steel welds. *The*

- Scientific World Journal*. 2014. ID 895790, 9 p.
<https://doi.org/10.1155/2014/895790>
- [56] Kalpana J., Rao P. S., Rao, P. G. Effect of frequency on impact strength of dissimilar weldments produced with vibration. *International Journal of Chemical Sciences*. 2016. No 3 (14), P. 1797-1804.
- [57] Gill J. S., Reddy T. K. Effect of weld pool vibration on fatigue strength and tensile strength of stainless steel butt welded joints by GTAW process. *World Congress on Engineering 2018: proceedings*, vol. II, London, 4-6 July 2018 / Newswood Limited, Hong Kong, 2018. 6 p.
- [58] Singh P. K., Patel D., Prasad S. B. Development of vibratory welding technique and tensile properties investigation of shielded metal arc welded joints. *Indian Journal of Science and Technology*. 2016. vol. 9 (35), 6 p.
<https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i35/92846>
- [59] Tewari S. P. Influence of Longitudinal oscillation on tensile properties of medium carbon steel welds of different thickness. *Thammasat International Journal of Science and Technology*. 2009. No 4 (14), P. 17-27.
- [60] Ерохин А. А., Силин Л. Л. Способы ввода ультразвуковых колебаний в сварочную ванну. *Сварочное производство*. 1960. №5, С. 4-7.
- [61] Ohrdes H., Nothdurft S., Nowroth C., Grajczak J., Twiefel J., Hermsdorf J., Kaielerle S., Wallaschek J. Influence of the ultrasonic vibration amplitude on the melt pool dynamics and the weld shape of laser beam welded EN AW-6082 utilizing a new excitation system for laser beam welding. *Production Engineering - Research and Development*. 2021. No 2 (15), P. 151-160. <https://doi.org/10.1007/s11740-020-01008-0>
- [62] Chen H., Guo N., Xu K., Liu C., Wang G. Investigating the advantages of ultrasonic-assisted welding technique applied in underwater wet welding by in-situ X-ray imaging method. *Materials*. 2020. No 6 (13), 1442, 14 p.
<https://doi.org/10.3390/ma13061442>

- [63] Бондаренко Л. Н., Демин Г. К., Буратинский А. П. Момент трения в подшипниках скольжения. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2016. №9 (222), С. 36-41.
- [64] Specification Stepper Motor. Kinco Motion Control. URL: <https://en.kinco.cn/productdetail/bjdj59.html> (дата звернення: 23.09.2024).
- [65] N Series Stepper Motor Driver 2M880N. User Manual Ver.: V1.0. URL: <http://www.t2cnc.hu/downloads/Kinco/2M880N%20User%20Manual.pdf> (дата звернення: 23.09.2024).
- [66] DRP-240-24 MEAN WELL, БЛОК ЖИВЛЕННЯ 240 ВТ, 24 В, 10 А НА DIN-РЕЙКУ. URL: <https://meanwell.in.ua/acdc/drp-240-24> (дата звернення: 23.09.2024).
- [67] Kinco. Programmable Logic Controller”, Product Catalog. – K306 – 24AT. URL: <https://2.imimg.com/data2/IL/XT/MY-2417883/programmeable-logic-controller.pdf> (дата звернення: 23.09.2024).
- [68] Потапьевский А. Г. Сварка в защитных газах плавящимся электродом. Москва: Машиностроение, 1974. 240 с.
- [69] Чебан В. А. Сварочные работы: учебное пособие. Ростов-на-Дону: Феникс, 2006. 413 с.
- [70] Фоминых В. П., Яковлев А. П., Электросварка. Учебник для проф.-тех. училищ. Москва: Высшая Школа, 1976. 288 с.
- [71] Welding Wire AWS A5.18 ER70S-6, Xiang Welding Industrial Co Ltd. URL: https://www.xiangind.com/aws_er70s-6 (дата звернення: 23.09.2024).
- [72] Багров В. А. Наплавлення та напилення покриттів. *Методичні вказівки до курсової роботи*. Харків: ХНАДУ, 2016. 60 с.
- [73] Акулов А. И., Бельчук Г. А., Демянцевич В. П. Технология и оборудование сварки плавлением. Москва: Машиностроение, 1977. 432 с.
- [74] Измеритель общей и локальной вибрации портативный ОКТАВА-101ВМ: руководство по эксплуатации РЭ 4277-002-76596538-05. URL: [Измеритель общей и локальной вибрации \(octava.info\)](http://octava.info) (дата звернення: 23.10.2023).

- [75] Пирумов А. Е., Скачков И. О., Супрун С. А., Максимов С. Ю. Специализированный комплекс для мониторинга процесса сварки. *ПИКАД: промышленные измерения, контроль, автоматизация, диагностика*. 2007. № 4, С. 18-19.
- [76] Кононенко В. Я. Сварка в среде защитных газов плавящимся и неплавящимся электродом: справочник. Киев: ТОВ «Ника-Принт», 2007. 266 с.
- [77] Данилов А. И., Гартманова И. С., Колосова Н. А., Миркин М. А. Условие сплошности наплавки при движении источника нагрева по синусоидальному закону. *Сварочное производство*. 1980. №2, С. 26.
- [78] Фихтенгольц Г. М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. Т1. Москва: Наука, 1969. 656 с.
- [79] Волченко В. Н., Ямпольский В. М., Винокуров В. А. и др. Теория сварочных процессов. Москва: Высшая школа, 1988. 559 с.
- [80] Рыкалин Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. Москва: Машгиз, 1951. 296 с.
- [81] STT-transfer of metal (metal transfer by surface tension). URL: <http://svarka-24.info/stt-perenos-metalla-perenos-metalla-poverxnostnym-natyazheniem/> (дата звернення: 23.09.2024).
- [82] CMT – cold metal transfer: «холодний» зварювальний процес для найвищої якості. URL: <https://www.fronius.com/uk-ua/ukraine/zvaryvalni-tehnolohiyi/svit-zvaryuvannya/fronius-welding-processes/cmt> (дата звернення: 02.11.2023).
- [83] Сараев Ю. Н. Особенности разработки электротехнологических процессов сварки и наплавки на основе алгоритмов адаптивного импульсного управления энергетическими параметрами режима. *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. 2015. № 3 (3), С. 3-11.
- [84] Penttilä S., Kah P., Ratava J., Eskelinen H. Artificial neural network controlled GMAW system: penetration and quality assurance in a multi-pass butt weld

- application. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2019. vol. 105, pp. 3369-3385.
<https://doi.org/10.1007/s00170-019-04424-4>
- [85] B. Mvola, “Adaptive gas metal arc welding control and optimization of welding parameters output: influence on welded joints”, *International Review of Mechanical Engineering (IREME)*. 2016. No 2 (10), P. 67-72.
<https://doi.org/10.15866/ireme.v10i2.7471>
- [86] Liu X., Yu X., Xue J. Effect of double-pulse characteristics on weld bead formation and mechanical properties in metal inert gas. *Metals*. 2021. No 6 (11), 995, 13 p.
<https://doi.org/10.3390/met11060995>
- [87] Ищенко И. Л., Дюргеров Н. Г. Плавление электрода и саморегулирование дуги при сварке с периодическими замыканиями дугового промежутка. *Сварочное производство*. 1961. № 6, С. 9-12.
- [88] Дюргеров Н. Г. О разрыве перемычки между электродом и сварочной ванной. *Сварочное производство*. 1972. № 3, С. 4-6.
- [89] Заруба И. И. Природа коротких замыканий дуги при сварке в углекислом газе промежутка. *Автоматическая сварка*. 1973. № 5, С. 14-17.
- [90] Походня И. К., Заруба И. И., Пономарев В. Е. и др. Критерии оценки стабильности процесса дуговой сварки на постоянном токе. *Автоматическая сварка*. 1989. № 8, С 1-4.
- [91] Ланкин Ю. Н. Показатели стабильности процесса дуговой сварки плавящимся электродом. *Автоматическая сварка*. 2011. № 1, С. 7-15.
- [92] Коновалов А. В., Куркин А. С., Макаров Э. Л., Неровный В. М., Якушин Б. Ф. Теория сварочных процессов: Учебник для вузов. Москва: МВТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. 748 с.
- [93] Потапьевский А. Г., Лаврищев В. Я. Разбрызгивание при сварке в углекислом газе проволокой Св-08Г2С. *Автоматическая сварка*. 1972. №8, С. 39-42.
- [94] Мазель А. Г. Технологические свойства электросварочной дуги. _Москва: Машиностроение, 1969. 178 с.

- [95] Ерохин А. А. Основы сварки плавлением. Физико-химические закономерности. Москва: Машиностроение, 1973. 448 с.
- [96] Ющенко К. А., Яровицин О. В., Хрущов Г. Д., Петрик І. А., Чигилейчик С. П. Дослідження і оптимізація процесу серійного ремонту робочих лопаток авіаційного газотурбінного двигуна Д-18Т мікроплазмовим порошковим наплавленням. *Космічна наука і технологія*. 2022. № 3 (28), С. 3-16. <https://doi.org/10.15407/knit2022.03.003>
- [97] Ленивкин В. А., Дюргеров Н. Г., Сагиров Х. Н. Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах. Москва: Машиностроение, 1989. 264 с.
- [98] Лесков Г. И. Электрическая сварочная дуга. Москва: Машиностроение, 1970. 335 с.
- [99] Лебедев В. А., Новиков С. В., Драган С. В., Симутенков И. В. Математическая модель процессов сварки и наплавки с управляемыми изменениями вылета электродной проволоки. *Збірник наукових праць НУК*. 2017. №1, С.48-54, <https://doi.org/10.15589/jnn20170108>
- [100] Холодов В. И. Планирование эксперимента в гидробиологических исследованиях. Симферополь: Н. Оріадна, 2016. 196 с.
- [101] Губин С. В., Яковлев А. И. Теория планирования экспериментов в энергетике: Курс лекций для высших технических учебных заведений. Киев: Миллениум, 2009. 158 с.
- [102] Батрак А. П. Планирование и организация эксперимента: Учебное пособие к изучению теоретического курса для студентов направления 220500. Красноярск: ИПЦ СФУ, 2010. 60 с.
- [103] Протодьяконов М. М., Тедер Р. И. Методика рационального планирования эксперимента. Москва: Наука, 1970. 76 с.
- [104] Шевельков В. В. Твёрдость – критерий упрочнения металлических материалов. *Вестник ПсковГУ. Серия «Экономические и технические науки»*. 2014. №5, С. 125-134.

- [105] Марковец М. П. Определение механических свойств металлов по твёрдости. Москва: Машиностроение, 1979. 191 с.
- [106] Стоев П. И., Мощенок В. И. Определение механических свойств металлов и сплавов по твердости. *Вестник Харьковского Национального университета им. В. Н. Каразина*. 2003. №2, Т.601 (22), С. 106-122.
- [107] Вуколов Э. А. Основы статистического анализа. Практикум по статистическим методам и исследованию операций с использованием пакетов STATISTICA и EXEL: учебное пособие. Москва: Форум, 2008. 464 с.
- [108] Шашков В. Б. Прикладной регрессионный анализ. Многофакторная регрессия: Учебное пособие. Оренбург: ГОУ ВПО ОГУ, 2003. 363 с.
- [109] Никулин М. С. Отношения правдоподобия критерий. Москва: Советская энциклопедия. Т. 4, 1984. С. 151-1216.
- [110] Лившиц Л. С., Хакимов А. Н. Металловедение сварки и термическая обработка сварных соединений. Москва: Машиностроение, 1989. 336 с.
- [111] Рябцев И. А., Сенченков И. К. Теория и практика наплавочных работ. Київ: Екотехнологія, 2013. 400 с.
- [112] Silva C. C., de Assis J. T., Philippov S., Farias J. P. Residual stress, microstructure and hardness of thin-walled low-carbon steel pipes welded manually. *Materials Research*. 2016. No 6 (19), P. 1215-1225. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2016-021>
- [113] Liu S., Chen P., Xianchong S., Hock A. J., Yao X., Zhenglin D., Chew Y. Mechanical performance of ER70S-6 low-carbon steel fabricated by wire arc additive manufacturing. *9th Intl. Conf. of Asian Society for Precision Engg. and Nanotechnology (ASPEN 2022): proceedings, Singapore, 15-18 November 2022 / Research Publishing (S) Pte Ltd, Singapore, 2022. P. 79-85. https://doi.org/10.3850/978-981-18-6021-8_OR-01-0075.html*
- [114] Gómora C. M., Ambriz R. R., García C. J., Ruíz-López I., Jaramillo D. Dissimilar dual phase-low carbon steel joints by the GMAW process subjected to impact load. *Metals*. 2022. No 3 (12), 404, 18 p. <https://doi.org/10.3390/met12030404>

- [115] Ron T., Levy G. K., Dolev O., Leon A., Shirizly A., Aghion E. Environmental behavior of low carbon steel produced by a wire arc additive manufacturing process. *Metals*. 2019. No 8 (9), 888, 14 p., <https://doi.org/10.3390/met9080888>
- [116] Трубецков Д. И., Рожнев А. Г. Линейные колебания и волны. Москва: Физматлит, 2001. 416 с.
- [117] Lebedev V., Novykov S. Analytical determination of increasing the surfacing bead width in depend on the amplitude-frequency characteristics of the welded bath vibration. *Modern Questions of Production and Repair in Industry and in Transport: materials of the 18th International Scientific and Technical Seminar, Brno, 10-16 February 2018 / Асоціація технологів-машинобудівників України, Київ, 2018. P. 165-169.*
- [118] Третьяков А. Ф. Курс лекций по дисциплине «Технология конструкционных материалов»: учебное пособие. Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 276 с.
- [119] Гайворонский А. А., Позняков В. Д., Маркашова Л. И., Бердникова Е. Н., Клапатюк А. В., Алексеенко Т. А., Шишкевич А. С. Влияние состава наплавленного металла на структуру и механические свойства восстановленных железнодорожных колес. *Автоматическая сварка*. 2012. №8, С. 18-24.
- [120] Onma C., Srithorn J. A Study of the Effecting of Welding Process for Gas Metal arc Welding Between Ferritic Stainless Steel 1.4003 and Carbon Steel ss400. *Industrial Engineering and Operations Management: proceedings of 13th Annual International Conference, Manila, 7-9 March 2023/ IEOM Society International, Southfield, 2023. P. 1680-1689. <https://doi.org/10.46254/AN13.20230476>*
- [121] Sabana M.F.A., Muhayat N., Triyono. Effect of the repair welding process on the microstructure and hardness of the t-joint S355J2+N steel. *Metalurgija*. 2023. vol. 62 (3-4), P. 371-374.
- [122] Грабин В. Ф., Денисенко А. В. Металловедение сварки низко- и среднелегированных сталей. Киев: Наук. думка, 1978. 276 с.
- [123] Хренов К. К. Сварка, резка и пайка металлов. Москва: Машгиз, 1952. 386 с.

ДОДАТКИ

Додаток А

**Список опублікованих праць за темою дисертації та відомості про
апробацію результатів дисертації**

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Лебедев В. А., **Новиков С. В.** Определение параметров процесса дуговой наплавки при программно изменяемых параметрах механических колебаний. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2016. № 1, С. 100-105.
2. Лебедев В. А., Яровицин А. В., **Новиков С. В.** Способы формирования игольчатого феррита в металле наплавленного валика (краткий анализ). *Вісник приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2016. Вип. 32. С. 113-117.
3. Лебедев В. А., **Новиков С. В.** Управление формированием структуры шва при воздействии низкочастотными механическими колебаниями на расплав сварочной ванны (обзор). *Збірник наукових праць НУК*. 2017. № 3, С. 21-28. doi: <https://doi.org/10.15589/jnn20170303>
4. Лебедев В. А., **Новиков С. В.**, Лой С. А. Аналитическое определение частоты коротких замыканий дуги при наплавке в углекислом газе с механическими колебаниями сварочной ванны. *Journal of Engineering Sciences*. 2017. № 1 (4), С. В6–В10. doi: [https://doi.org/10.21272/jes.2017.4\(1\).b2](https://doi.org/10.21272/jes.2017.4(1).b2)
5. Lebedev V. A., **Novykov S. V.** The hypothesis of formation of the structure of surfaced metal at the surfacing based on the application of the prognostic algorithm of control the electrode wire speed. *Journal of Engineering Sciences*. 2017. № 2 (4), С. В15–В18. doi: [https://doi.org/10.21272/jes.2017.4\(2\).b15](https://doi.org/10.21272/jes.2017.4(2).b15)
6. Лебедев В. А., **Новиков С. В.**, Драган С. В., Симутенков И. В. Математическая модель процессов сварки и наплавки с управляемыми изменениями вылета

- электродной проволоки. *Збірник наукових праць НУК*. 2017. № 1, С. 48–54. doi: <https://doi.org/10.15589/jnn20170108>
7. Лебедев В. А., Жук Г. В., Драган С. В., Симутенков И. В., **Новиков С. В.** Математическое обоснование дозированной импульсной подачи электродной проволоки при механизированной сварке в защитных газах. *Shipbuilding & Marine Infrastructure*. 2018. № 2(10), С. 158-167.
 8. Лебедев В. А., Соломийчук Т. Г., **Новиков С. В.** The influence of weld pool harmonic oscillations by frequency up to 4,5 Hz onto the metal structure formation of weld bead and heat affected zone. *Shipbuilding & Marine Infrastructure*. 2018. № 2(10), С. 168-172.
 9. Lebedev V. A., Solomiichuk T. G., **Novykov S. V.** Study of a Welding Pool Harmonic Oscillations Influence on the Welded Metal Hardness and Weld Bead Width. *Journal of Engineering Sciences*. 2019. № 1 (6), С. C16–C21. doi: [https://doi.org/10.21272/jes.2019.6\(1\).c4](https://doi.org/10.21272/jes.2019.6(1).c4)
 10. Лебедев В. А., Драган С. В., Жук Г. В., **Новиков С. В.**, Симутенков И. В. Применение импульсных воздействий при дуговой сварке плавящимся электродом в среде защитных газов (обзор). *Автоматическая сварка*. 2019. № 8, С.30-40. doi: <https://doi.org/10.15407/as2019.08.04>
 11. Лебедев В. А., **Новиков С. В.**, Соломийчук Т. Г. Определение твердости наплавленного металла и металла зоны термического влияния (ЗТВ) при низкочастотных колебаниях сварочной ванны. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2019. № 2, С. 54-61. doi: <https://doi.org/10.15588/1607-6885-2019-2-9>
 12. Лебедев В. А., **Новиков С. В.** Колебатель изделия для автоматической дуговой наплавки. *Технічні науки та технології*. 2020. № 2 (20), С. 11-21. doi: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-2\(20\)-11-21](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-2(20)-11-21)
 13. Lebedev V. O., **Novykov S. V.** Influence of Weld Pool Low-Frequency Oscillations on the Formation of Crystallites' Size and Welded Metal Microstructure. *Metallofiz.*

Noveishie Tekhnol. 2022. No 3 (44), P. 419-430. doi: <https://doi.org/10.15407/mfint.44.03.0419>

14. **Novykov S.** Investigation of the influence of low-frequency harmonic oscillations on deposited metal. *Kovove Mater.* 2022. No 5 (60), P. 315-326. doi: <https://doi.org/10.31577/km.2022.5.315>

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

15. Лебедєв В., **Новиков С.** Аналіз впливу низькочастотних коливань зварювальної ванни на частоту перенесення електродного металу. *Міцність і довговічність сучасних матеріалів та конструкцій: праці Міжнар. наук-техн. конф., м. Тернопіль, 10-11 листопада 2022 р. / Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., Тернопіль, 2022. С. 122-124.*
16. Лебедєв В. О., **Новиков С. В.** Практичне застосування електродугового автоматичного наплавлення з керованими коливаннями виробу. *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: матеріали ХХ міжнар. наук-техн. конф., Краматорськ-Тернопіль, 01-03 вересня 2022 р. / ДДМА, Краматорск, 2022. С.132-133.*
17. Лебедєв В. О., **Новиков С. В.** Установа для наплавлення та зварювання в середовищі CO₂ з механічними поперечними гармонічними коливаннями зварювальної ванни. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем: матеріали ХІІ міжнар. наук-практ. конф. Т.2, м. Чернігів, 26-27 травня 2022 р. / Національний університет «Чернігівська політехніка» [та ін.], Чернігів, 2022. С.42-43.*
18. **Новиков С. В.** Дугове наплавлення у вуглекислому газі з використанням механічних низькочастотних гармонійних коливань зварювальної ванни. *Доповідь. Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем: матеріали ХІ Міжнар. наук-практ. конф., м. Чернігів, 26-27 травня*

2021 р. / *Витяг з протоколу пленарного засідання №2 для доповідей за закінченими дисертаційними роботами.*

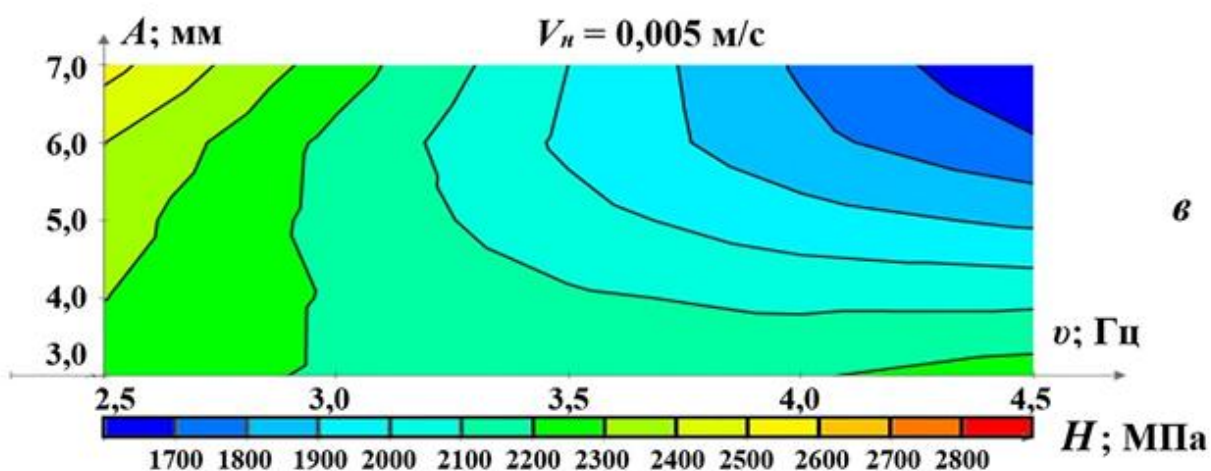
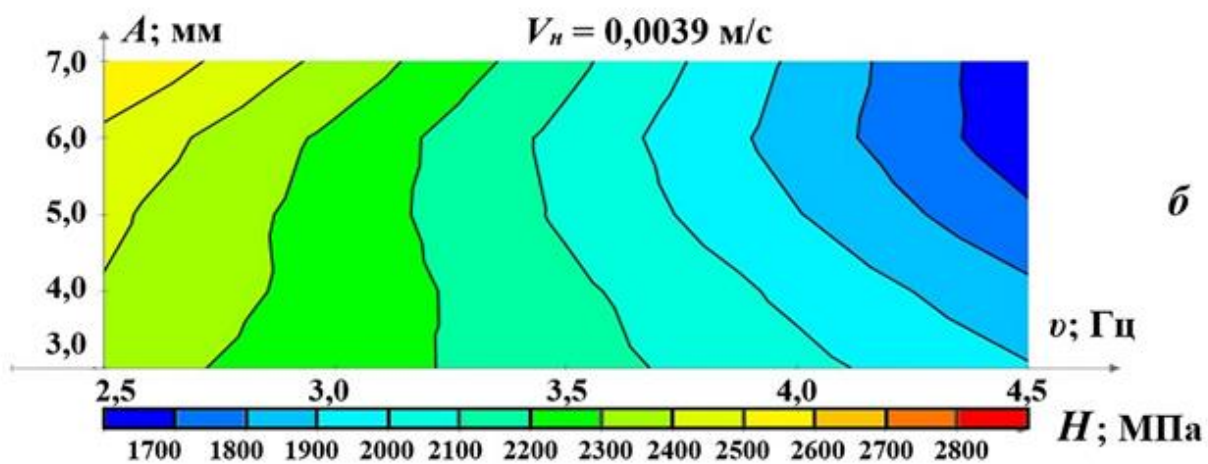
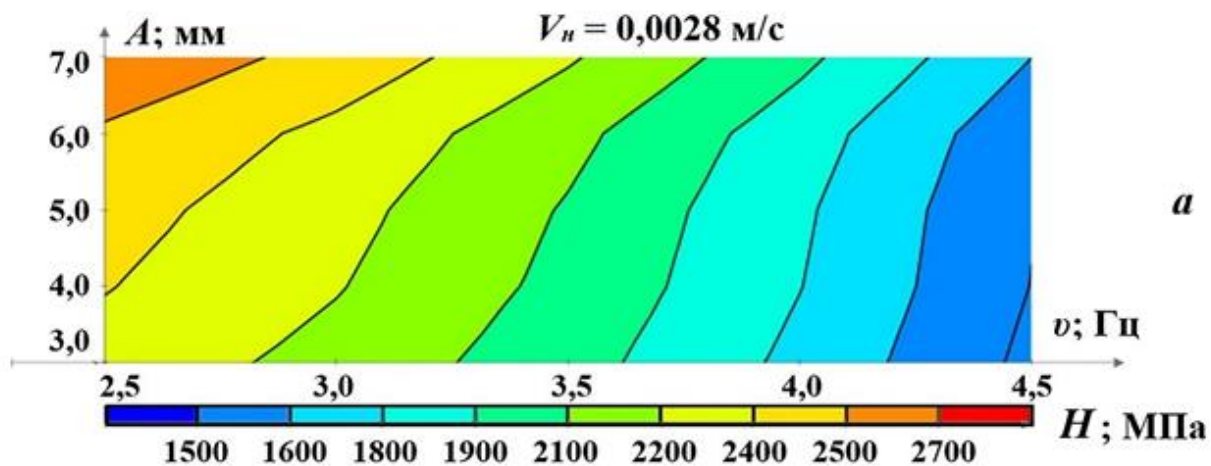
19. Лебедев В. А., **Новиков С. В.** Моделирование величин твёрдости наплавленного металла и металла ЗТВ при низкочастотных колебаниях сварочной ванны. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем: матеріали X Міжнар. наук-практ. конф., Т.3, м. Чернігів, 23-25 вересня 2020 р. / Національний університет «Чернігівська політехніка» [та ін.], Чернігів, 2020. С.37-38.*
20. Лебедев В. А., **Новиков С. В.**, Халимовский А. М. Влияние параметров колебаний сварочной ванны на частоту переноса электродного металла. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем: матеріали X Міжнар. наук-практ. конф., Т.2, м. Чернігів, 29-30 квітня 2020 р. / Національний університет «Чернігівська політехніка» [та ін.], Чернігів, 2020. С.43-44.*
21. Лебедев В. А., **Новиков С. В.**, Соломийчук Т. Г. Влияние гармонических колебаний сварочной ванны частотой до 5 Гц на величину зерна металла наплавленного. *Modern Questions of Production and Repair in Industry and in Transport: materials of the 19th International Scientific and Technical Seminar, Kosice, 18-23 February 2019 / Асоціація технологів-машинобудівників України, Київ, 2019. Р. 102-105.*
22. Lebedev V., **Novykov S.** Analytical determination of increasing the surfacing bead width in depend on the amplitude-frequency characteristics of the welded bath vibration. *Modern Questions of Production and Repair in Industry and in Transport: materials of the 18th International Scientific and Technical Seminar, Brno, 10-16 February 2018 / Асоціація технологів-машинобудівників України, Київ, 2018. Р. 165-169.*
23. Лебедев В. А., **Новиков С. В.** Расчёт скорости наплавки в условиях аддитивных колебаний сварочного инструмента и ванны. *Перспективна техніка і технології – 2017: матеріали XIII Міжнар. наук-практ. конф.*

- молодих учених, аспірантів і студентів, м. Миколаїв, 27-29 вересня 2017 р. / М-во освіти і науки України, Миколаїв. нац. аграрний ун-т, Миколаїв, 2017. С.53-61.
24. Лебедев В. А., **Новиков С. В.** Разработка методов снижения степени разбрызгивания металла при наплавке в среде углекислого газа с поперечными колебаниями сварочной ванны. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали VIII міжнар. наук – техн. конф.*, м. Миколаїв, 11-13 жовтня 2017 р. / Нац. ун-т. кораблебуд. ім. адмірала Макарова, Миколаїв, 2017. С.160-162.
25. Лебедев В. А., Симутенков И. В., Драган С. В., Жук Г. В., **Новиков С. В.** Автоматическая наплавка под флюсом с поперечной высокочастотной вибрацией электродной проволоки. *Вібрації в техніці та технологіях: збірник тез та доповідей XVI Міжнар. наук – техн. конф.*, м. Вінниця, 26-28 жовтня 2017 р. / ВНТУ, Вінниця, 2017. С.40-42.
26. Лебедев В. А., Симутенков И. В., Драган С. В., Жук Г. В., **Новиков С. В.** Устройство для автоматической наплавки под флюсом с вибрационным воздействием на электродную проволоку. *Вібрації в техніці та технологіях: збірник тез та доповідей XVI Міжнар. наук – техн. конф.*, м. Вінниця, 26-28 жовтня 2017 р. / ВНТУ, Вінниця, 2017. С.71-73.
27. Лебедев В. А., **Новиков С. В.**, Жук Г. В. Расчёт скорости наплавки в условиях аддитивного воздействия колебания сварочного инструмента и вибрации сварочной ванны. *Вібрації в техніці та технологіях: збірник тез та доповідей XVI Міжнар. наук – техн. конф.*, м. Вінниця, 26-28 жовтня 2017 р. / ВНТУ, Вінниця, 2017. С.81-84.
28. Lebedev V., **Novykov S.** Energy and resource saving at arc welding with a controlled oscillation of welding pool. *9th International Conference of Young Scientists on Welding and Related Technologies: proceedings*, Kyiv, 23-26 May 2017 / DIA Ltd., Kyiv, 2017. P. 81-83.
29. Лебедев В. А., **Новиков С. В.** Аналитическое определение скорости наплавки в условиях внешних механических колебаний сварочной ванны и

- инструмента. *Инженерия поверхности и реновация изделий*: матер. 17 – і Міжнар. наук – техн. конф., Одеса-Київ, 29 травня-02 червня 2017 р. / Асоціація технологів-машинобудівників України, Київ, 2017. С.252-254.
30. Лебедев В. А., **Новиков С. В.** Анализ управления формированием наплавленной структуры металла шва за счёт механического воздействия на сварочную ванну и сварочный инструмент. *Сварка и родственные технологии: перспективы развития*: матер. 17 – і Міжнар. IV наук – техн. конф., м. Краматорськ, 04-08 жовтня 2016 р. / ДДМА, Краматорськ, 2016. С.90-92.
31. Лебедев В. О., Драган С. В., Галь А. Ф., Сімутенков І. В., **Новиков С. В.** Спосіб забезпечення суцільності шару, наплавленого електродуговим зварюванням по гвинтовій лінії. Патент України на корисну модель № 113943. Бюлетень винаходу. №4. Дата публікації 27.02.17.
32. Лебедев В. О., Драган С. В., Галь А. Ф., Сімутенков І. В., **Новиков С. В.** Спосіб електродугового наплавлення з керуванням формою поверхні валика. Патент України на корисну модель № 120877. Бюлетень винаходу. №22. Дата публікації 27.11.17.
33. Лебедев В. О., Драган С. В., Галь А. Ф., Сімутенков І. В., **Новиков С. В.** Установка для автоматического дугового наплавления внешних поверхностей деталей обертання. Патент України на корисну модель № 112270. Бюлетень винаходу. №23. Дата публікації 12.12.16.

ДОДАТОК Б

Контурні графіки формування твердості наплавленого металу H , що отримані за моделлю (4.7)



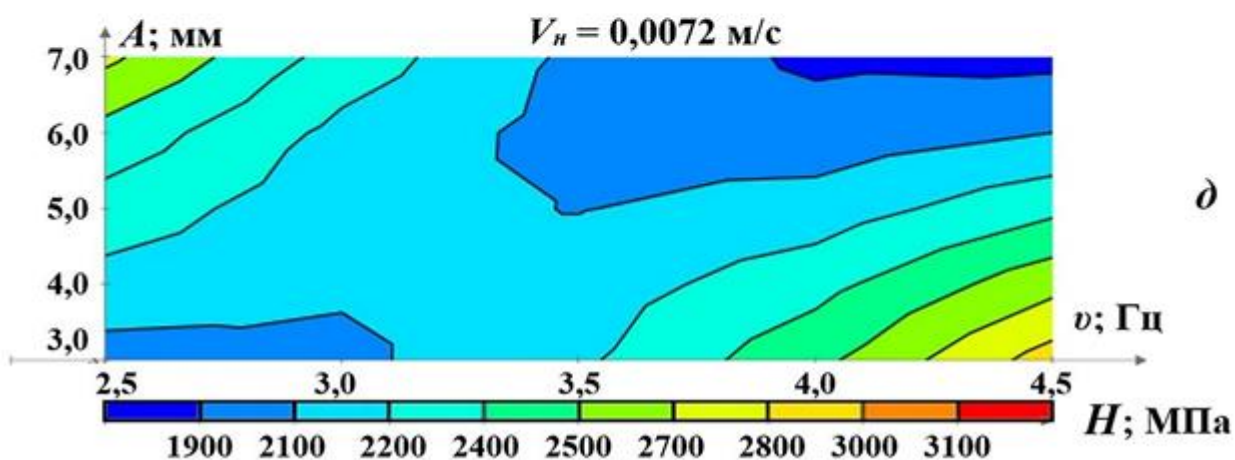
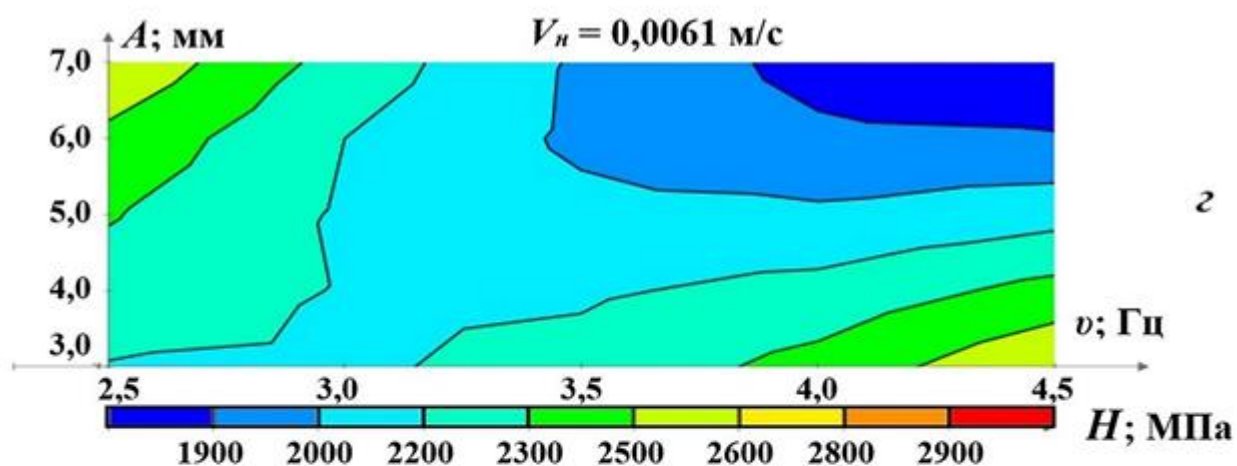
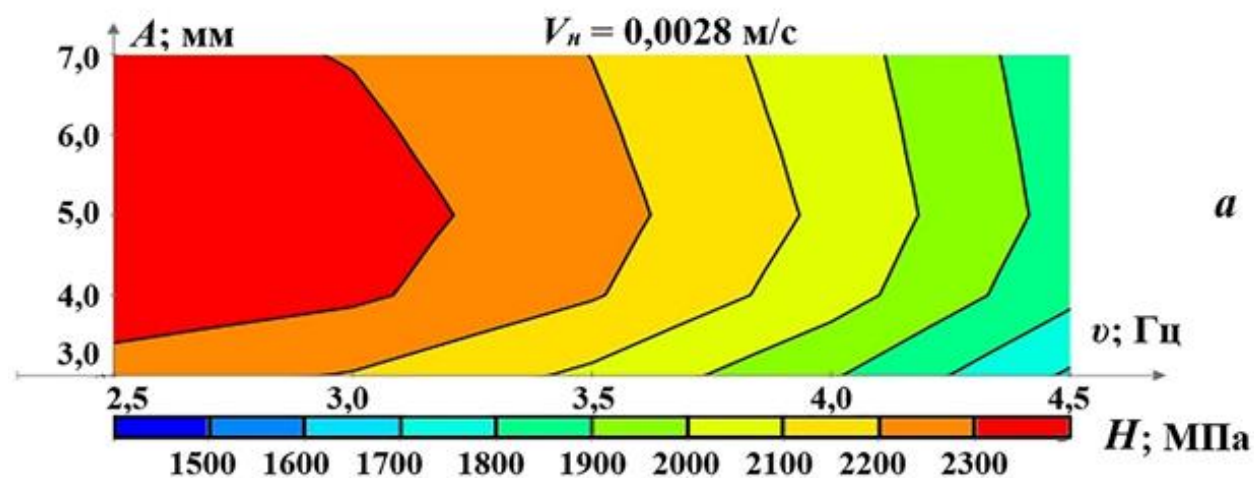
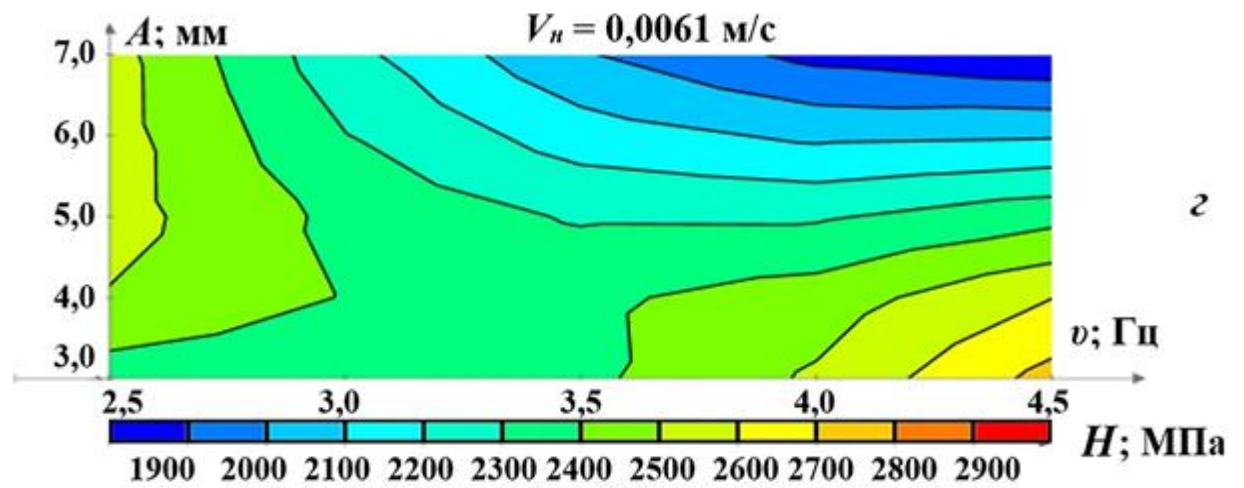
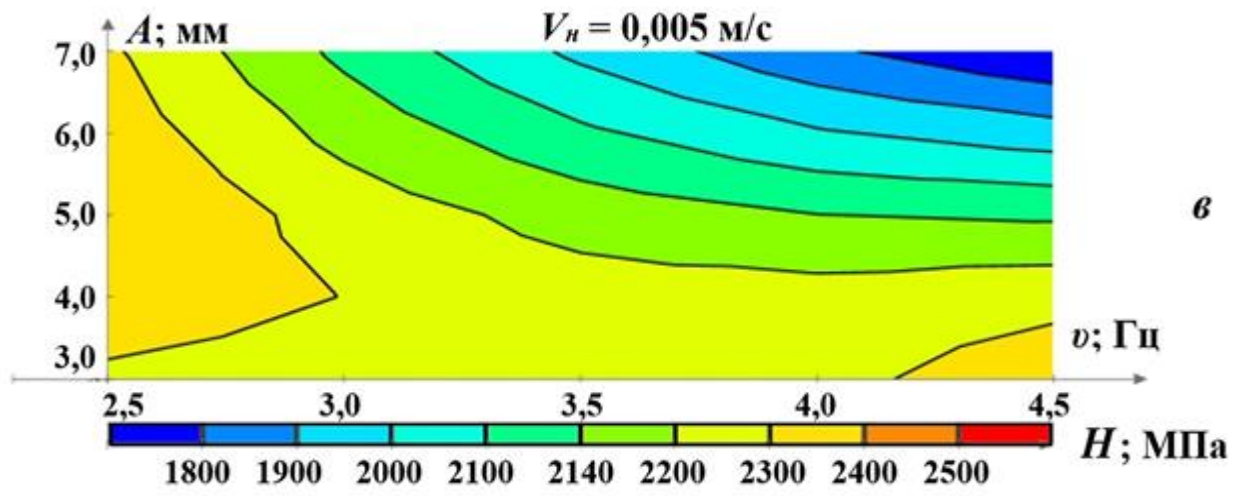
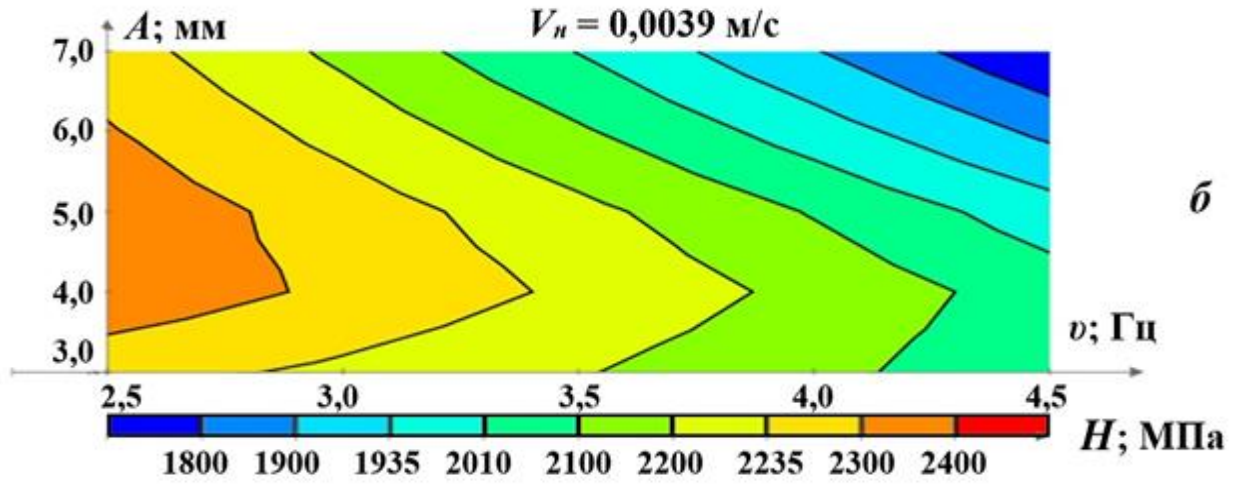


Рисунок Б.1 – Графіки формування твердості наплавленого металу H за зварювальним струмом $I_n = 100,0 \text{ А}$: а – за $V_n = 0,0028 \text{ м/с}$, б – за $V_n = 0,0039 \text{ м/с}$, в – за $V_n = 0,005 \text{ м/с}$, г – за $V_n = 0,0061 \text{ м/с}$, д – за $V_n = 0,0072 \text{ м/с}$





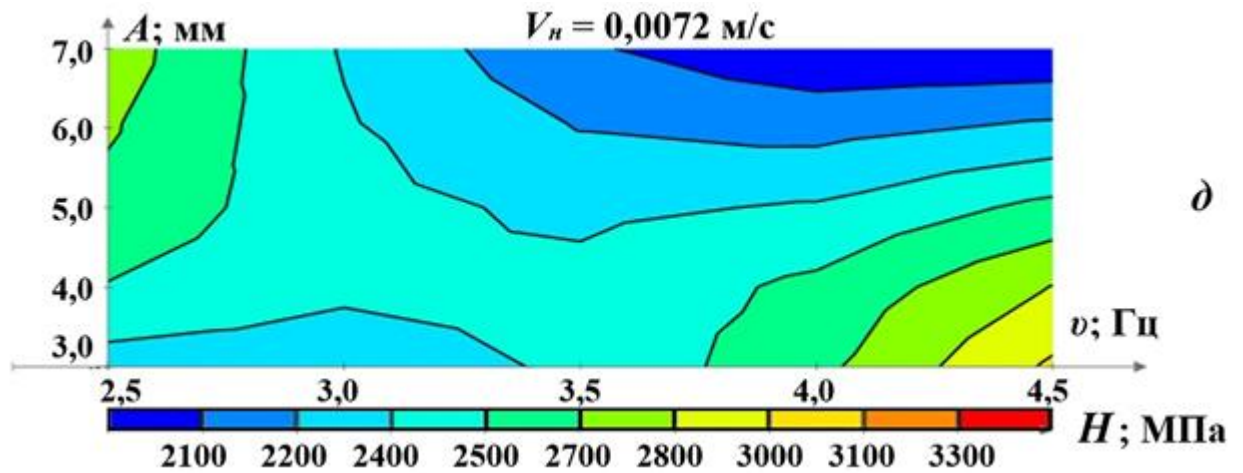
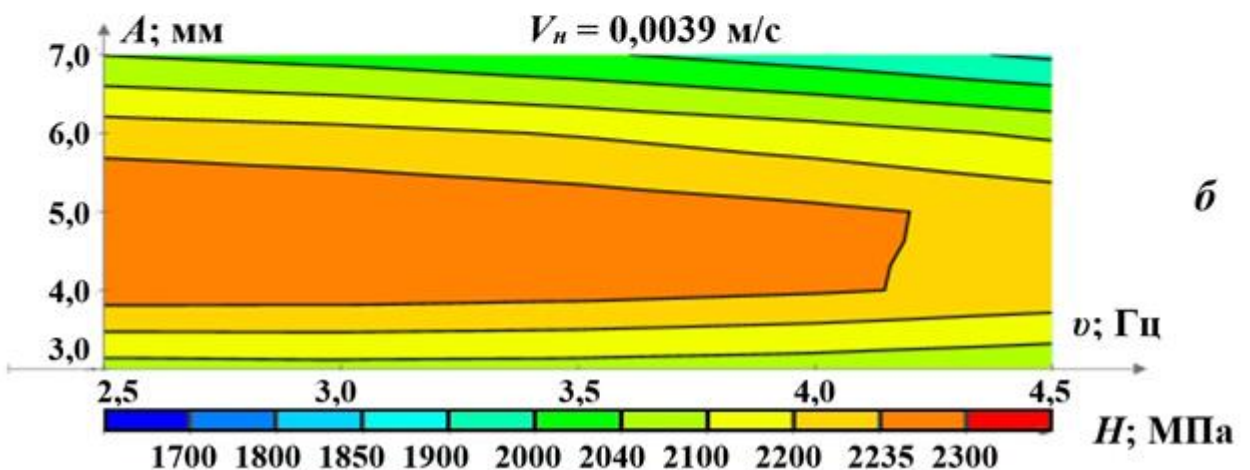
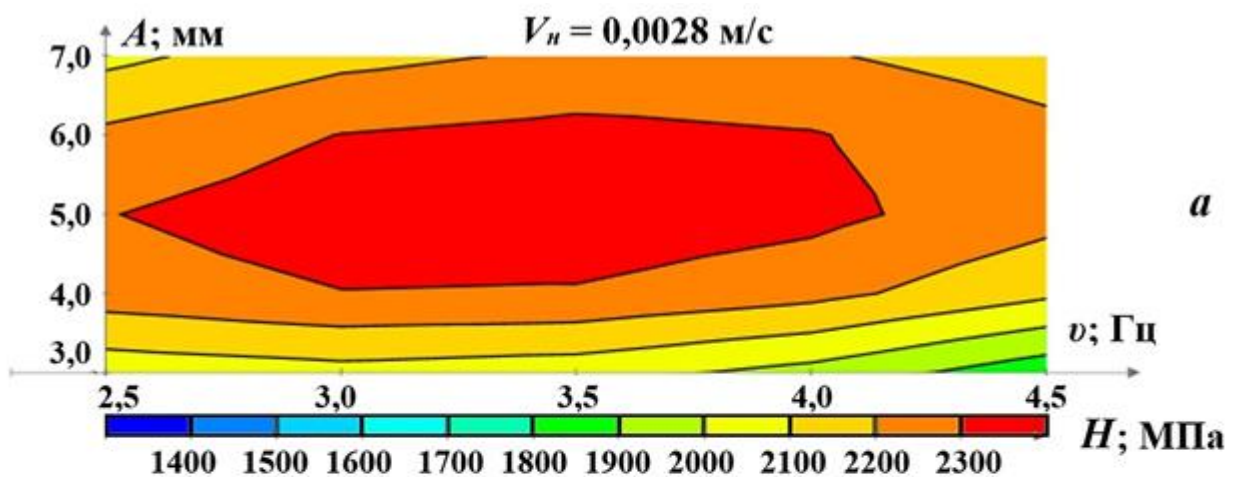


Рисунок Б.2 – Графіки формування твердості наплавленого металу H

за зварювальним струмом $I_n = 125,0$ А: а – за $V_n = 0,0028$ м/с, б – за $V_n = 0,0039$ м/с, в – за $V_n = 0,005$ м/с, г – за $V_n = 0,0061$ м/с, д – за $V_n = 0,0072$ м/с



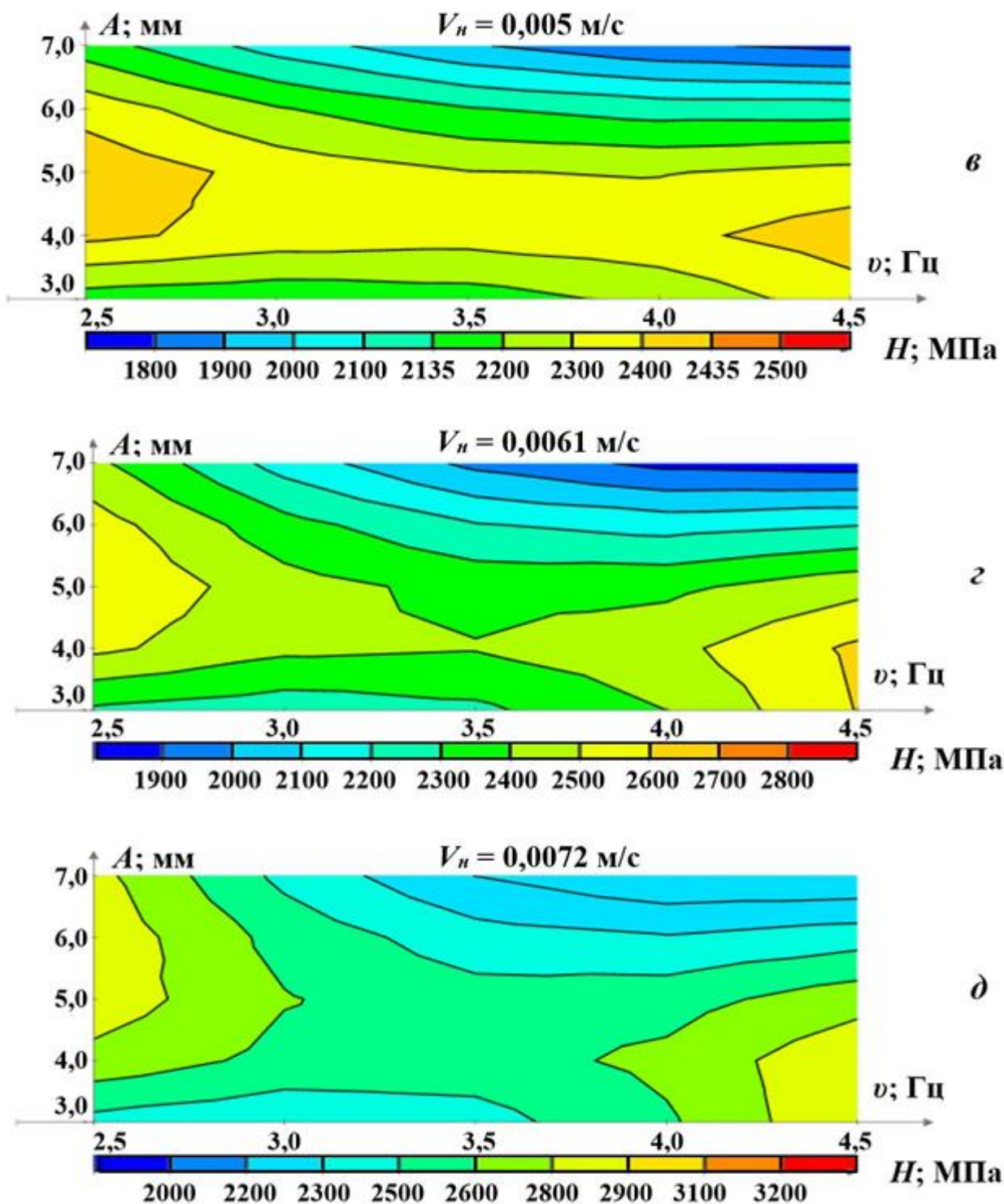
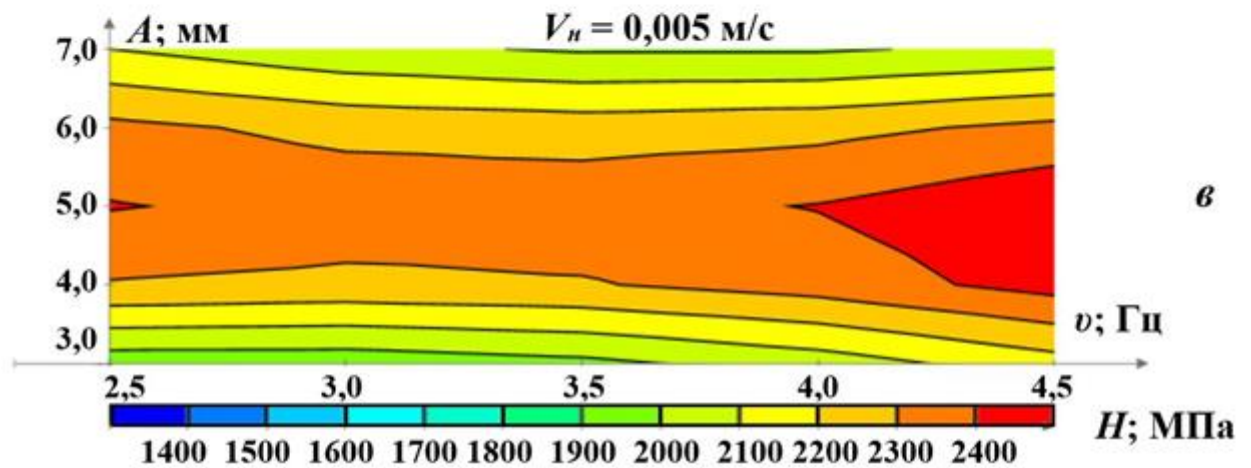
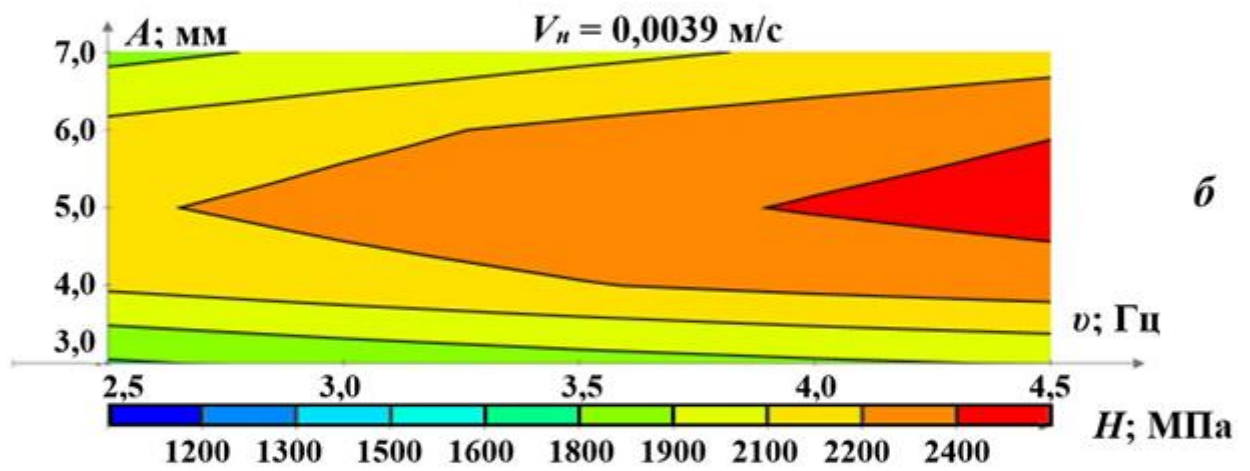
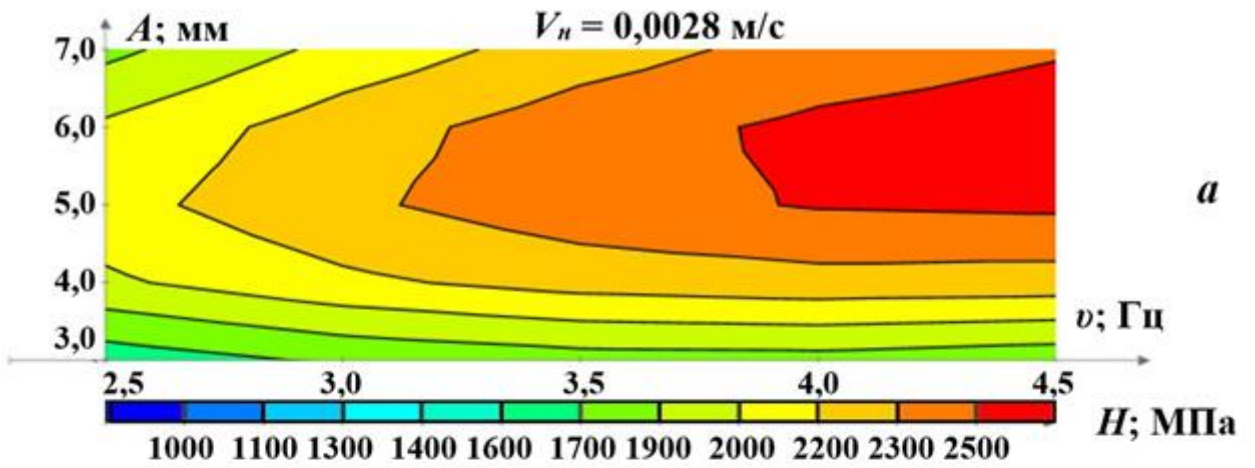


Рисунок Б.3 – Графіки формування твердості наплавленого металу H за зварювальним струмом $I_n = 150,0$ А: а – за $V_n = 0,0028$ м/с, б – за $V_n = 0,0039$ м/с, в – за $V_n = 0,005$ м/с, г – за $V_n = 0,0061$ м/с, д – за $V_n = 0,0072$ м/с



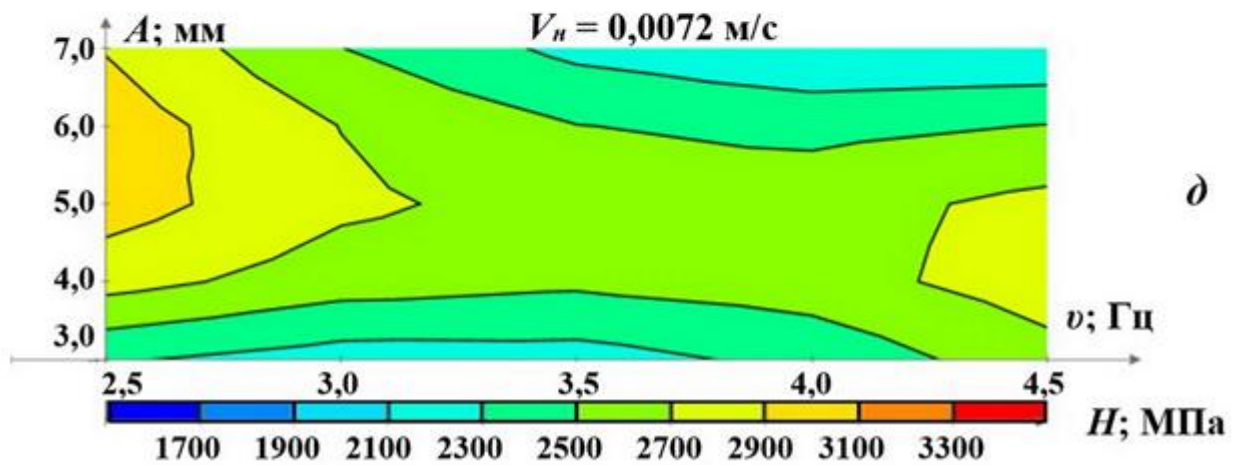
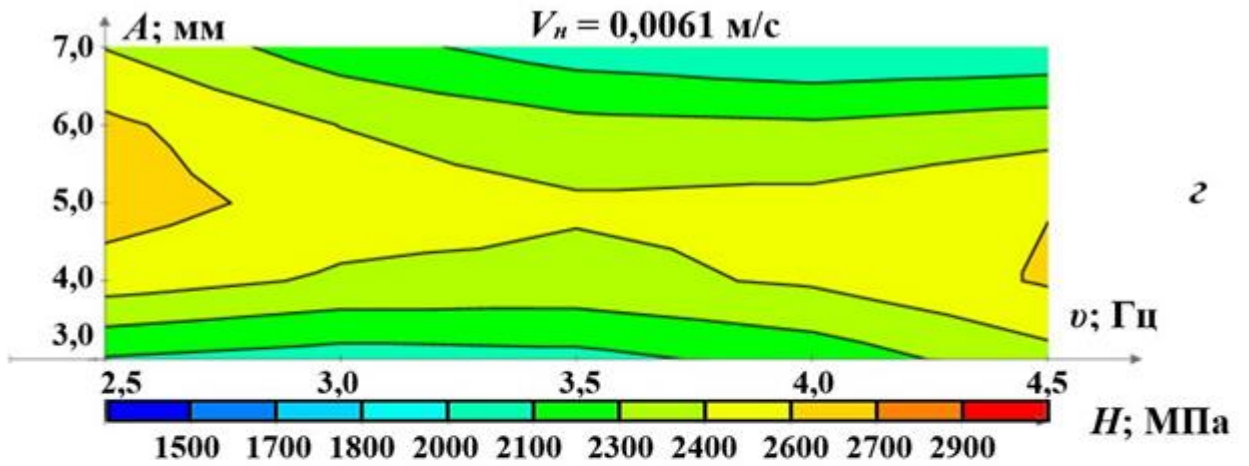
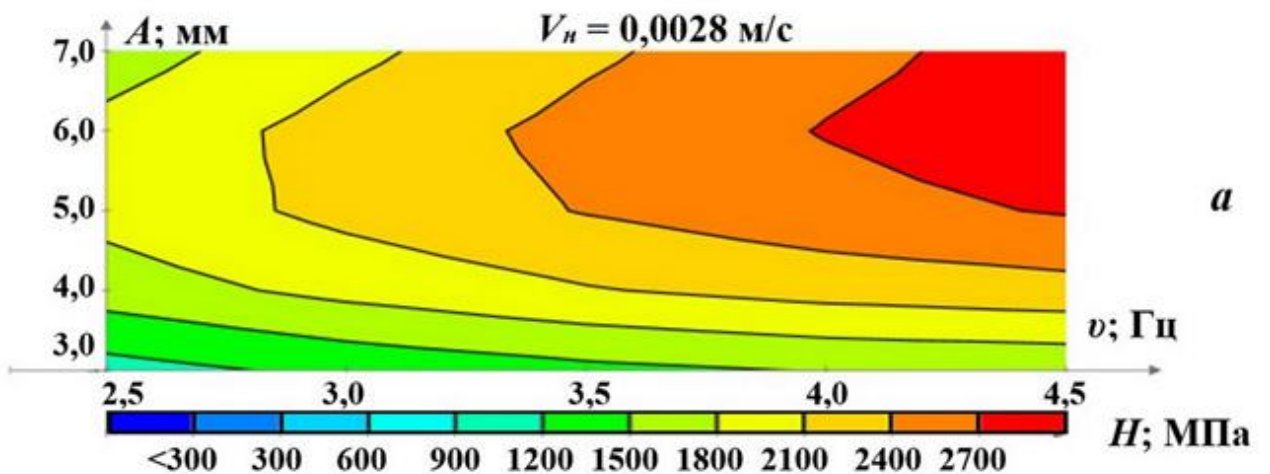
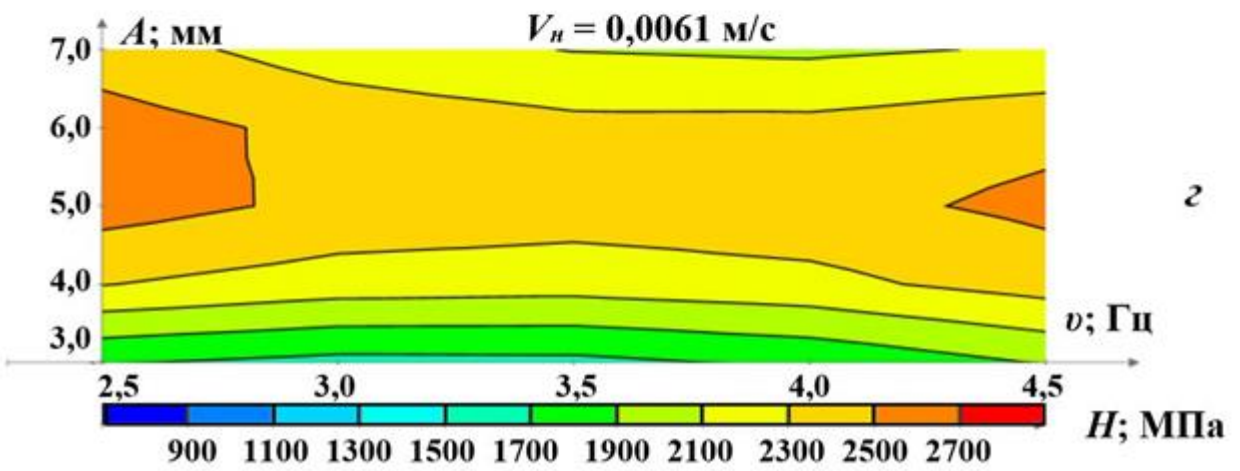
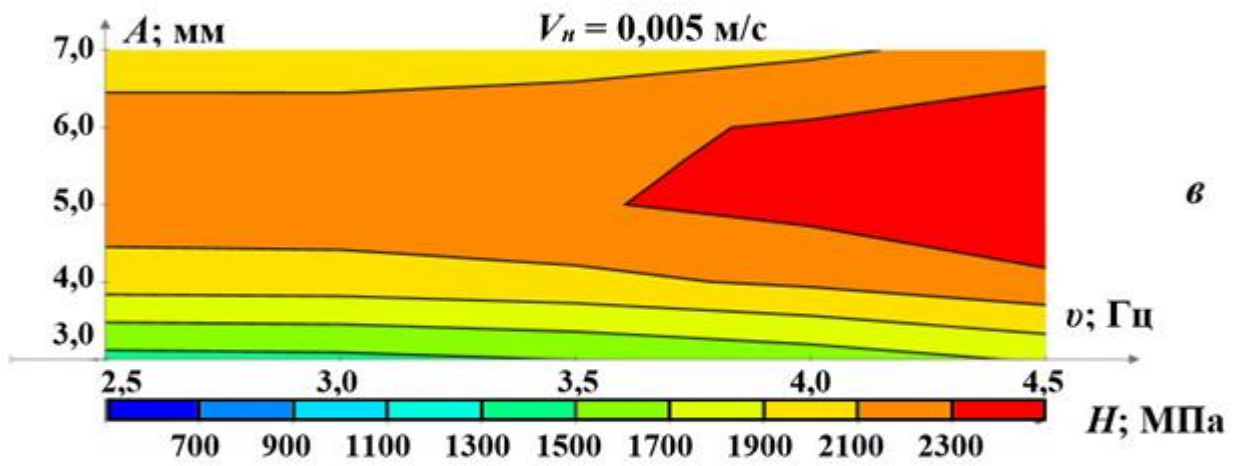
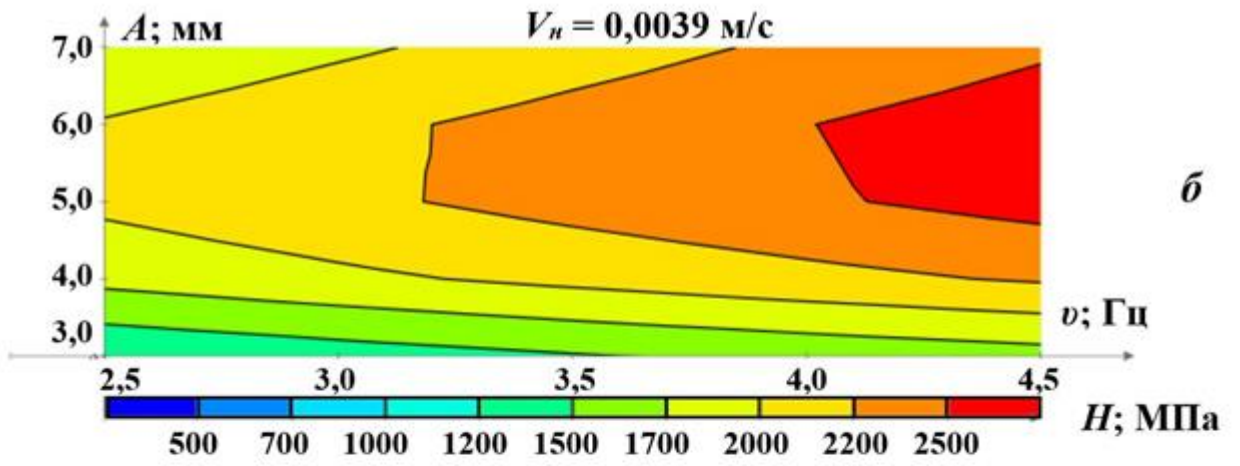


Рисунок Б.4 – Графіки формування твердості наплавленого металу H зварювальним струмом $I_n = 175,0$ А: а – за $V_n = 0,0028$ м/с, б – за $V_n = 0,0039$ м/с, в – за $V_n = 0,005$ м/с, г – за $V_n = 0,0061$ м/с, д – за $V_n = 0,0072$ м/с





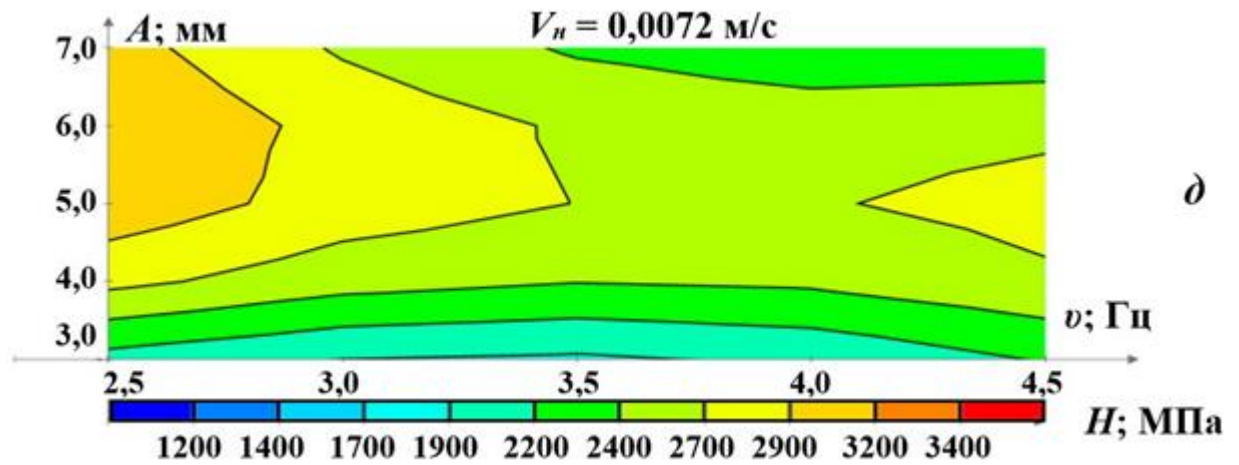
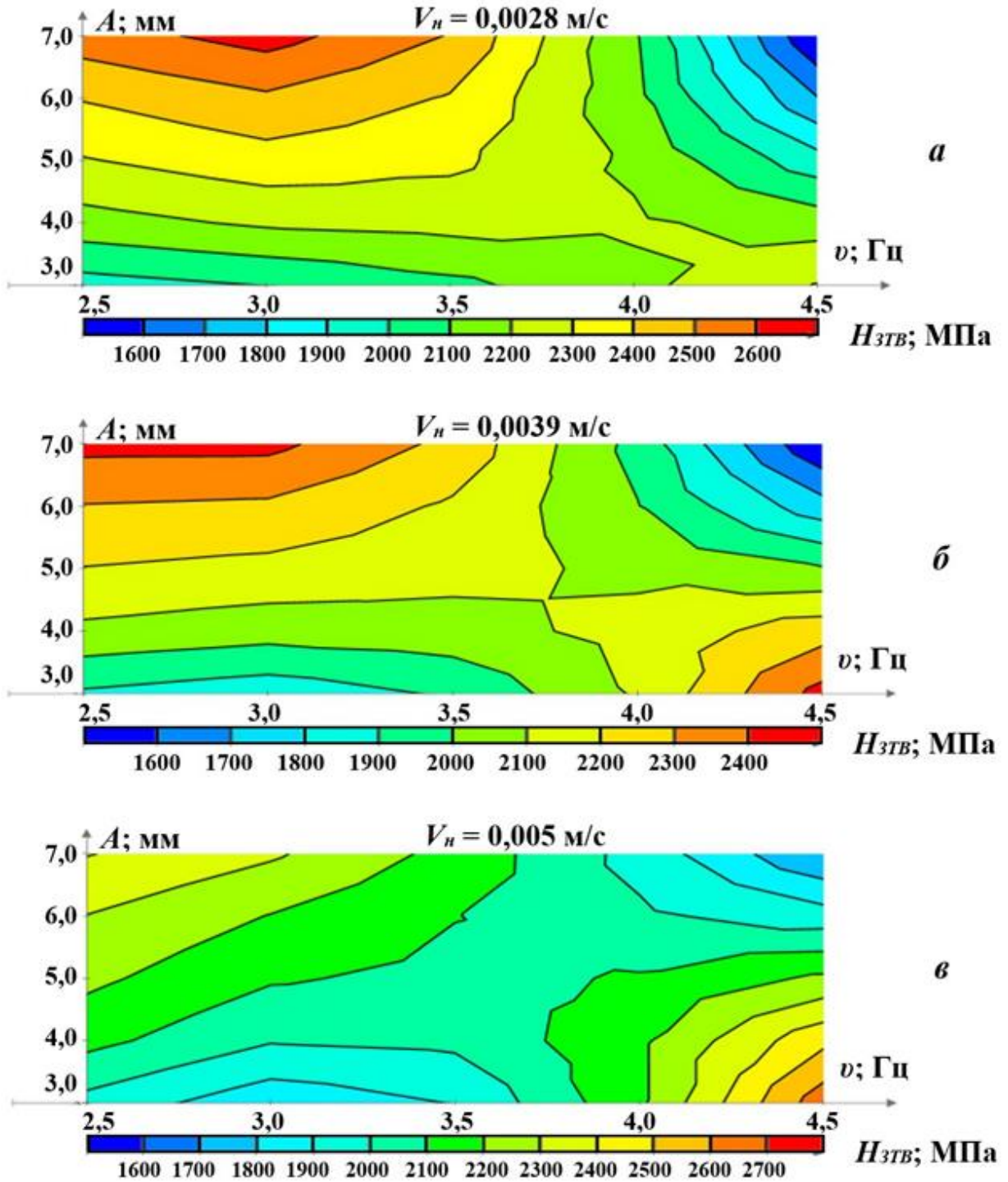


Рисунок Б.5 – Графіки формування твердості наплавленого металу H за зварювальним струмом $I_n = 200,0$ А: а – за $V_n = 0,0028$ м/с, б – за $V_n = 0,0039$ м/с, в – за $V_n = 0,005$ м/с, г – за $V_n = 0,0061$ м/с, д – за $V_n = 0,0072$ м/с

ДОДАТОК В

Контурні графіки формування твердості металу ЗТВ, що отримані за моделлю (4.8)



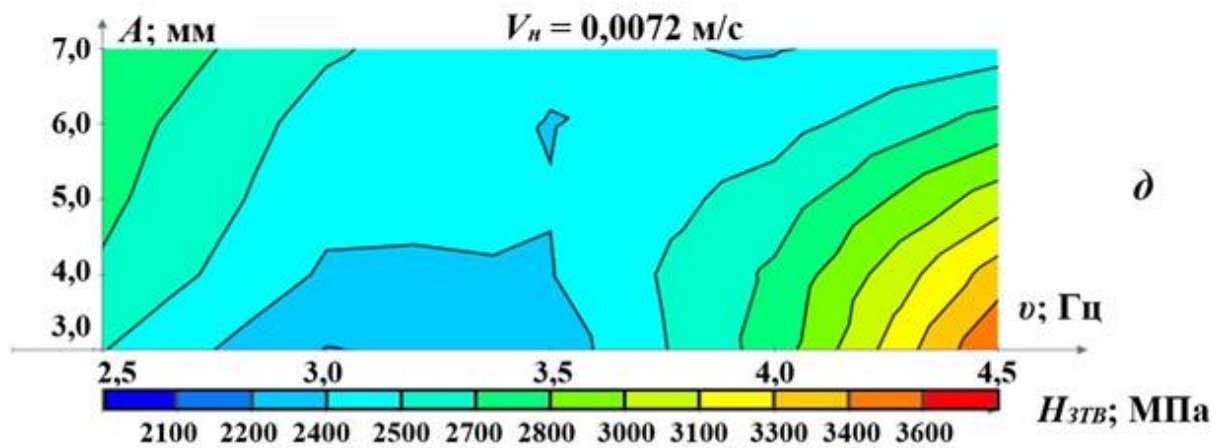
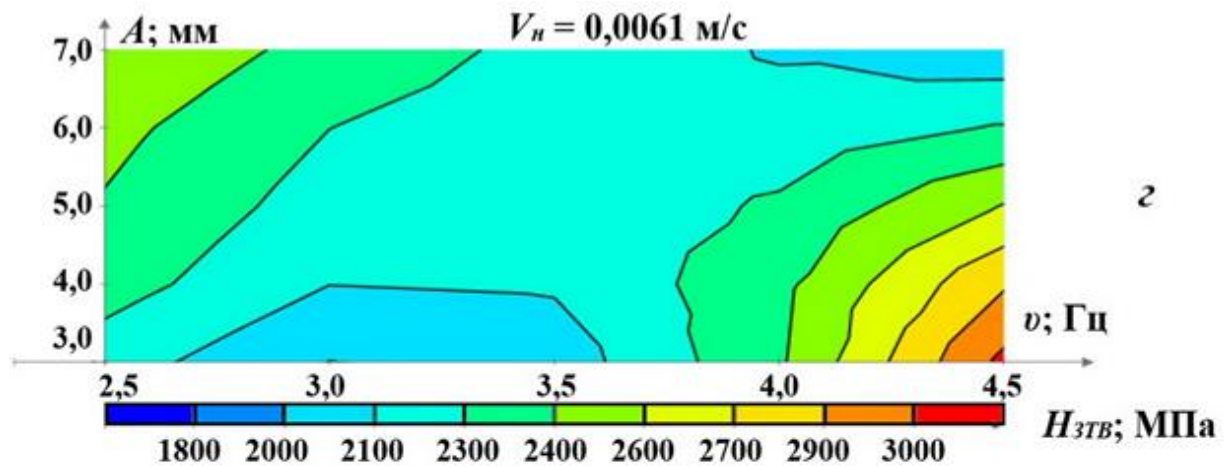
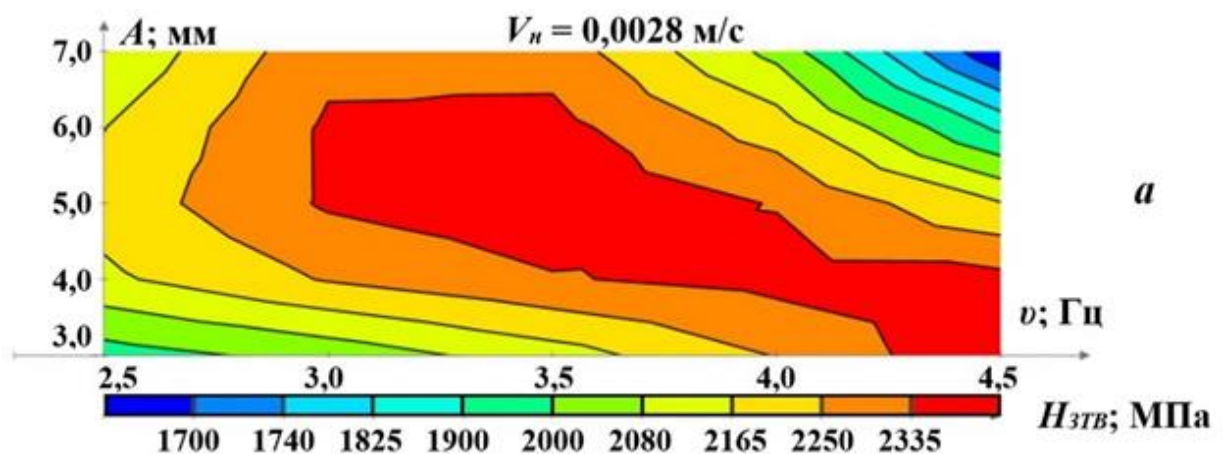
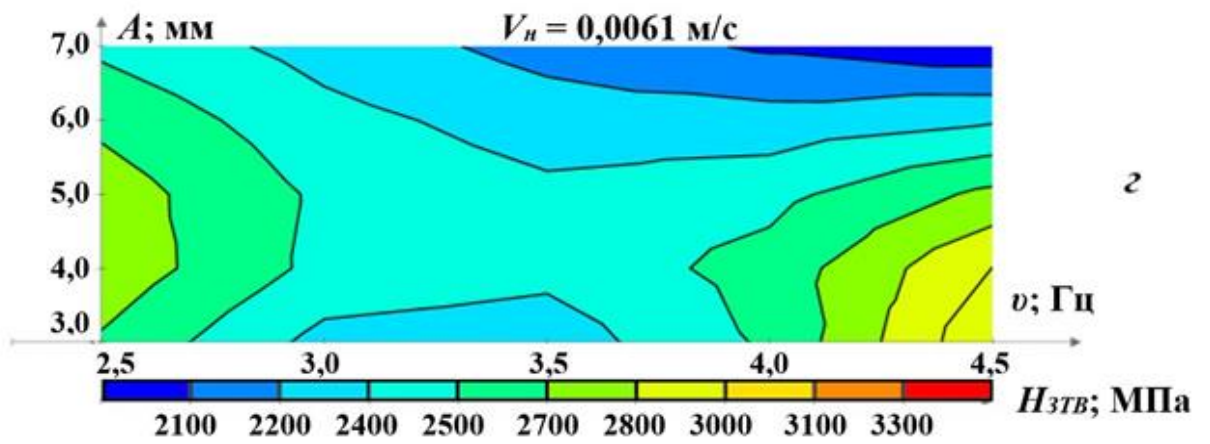
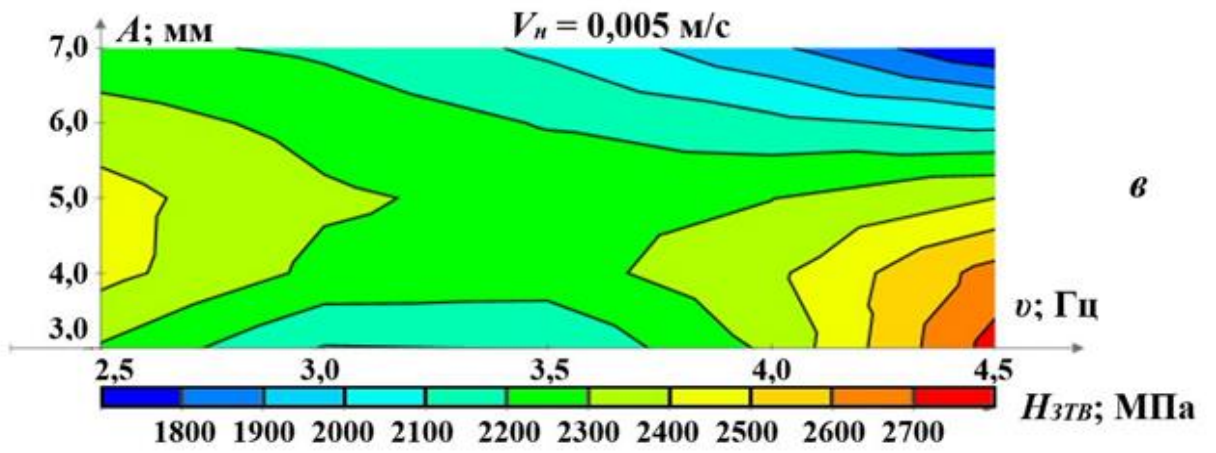
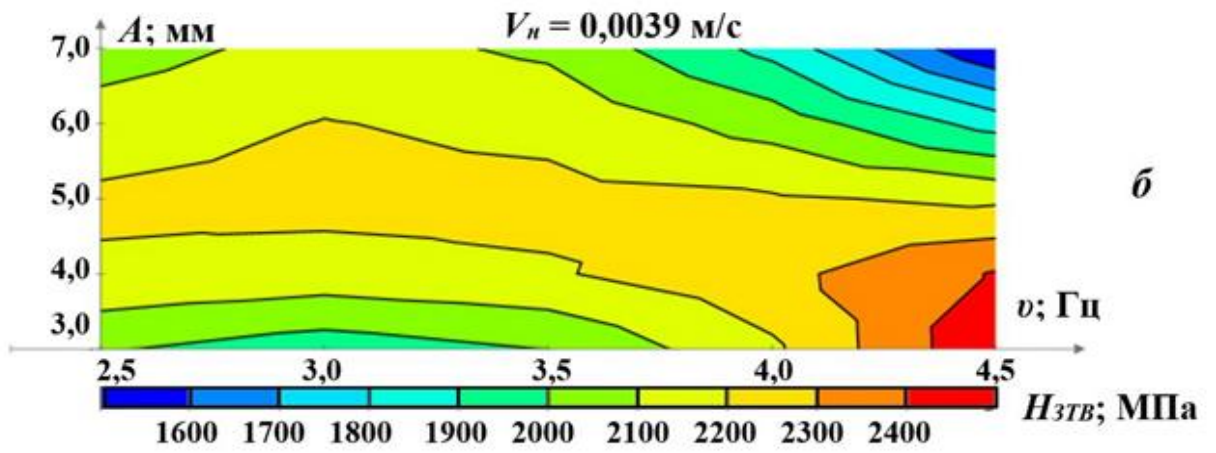


Рисунок В.1 – Графіки формування твердості металу ЗТВ $H_{ЗТВ}$ за зварювальним струмом $I_n = 100,0 \text{ А}$: а – за $V_n = 0,0028 \text{ м/с}$, б – за $V_n = 0,0039 \text{ м/с}$, в – за $V_n = 0,005 \text{ м/с}$, г – за $V_n = 0,0061 \text{ м/с}$, д – за $V_n = 0,0072 \text{ м/с}$





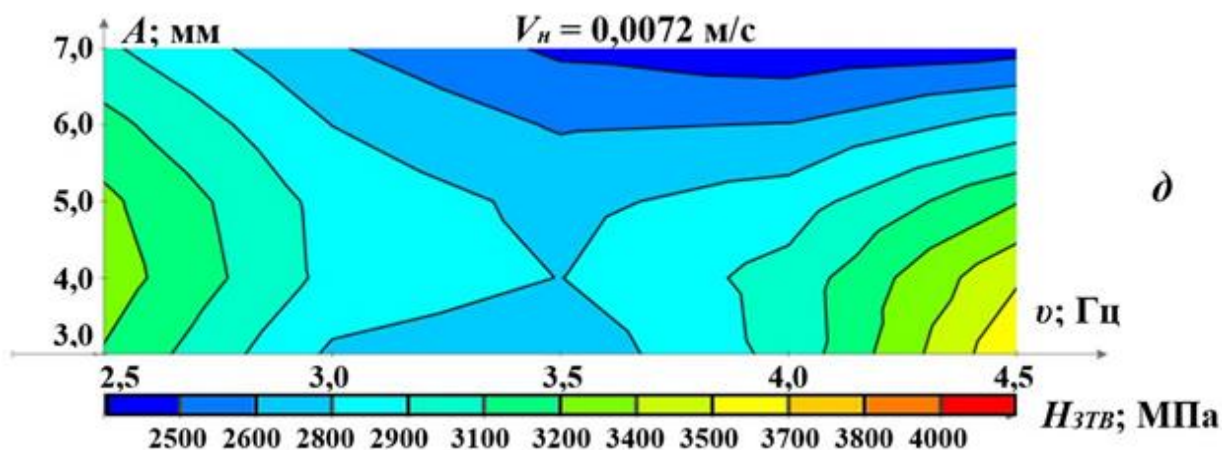
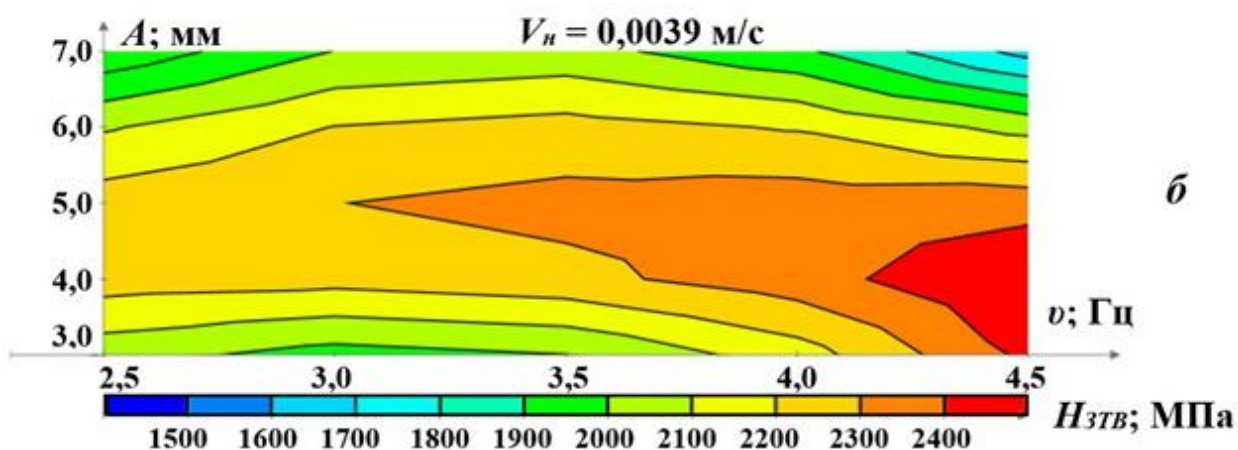
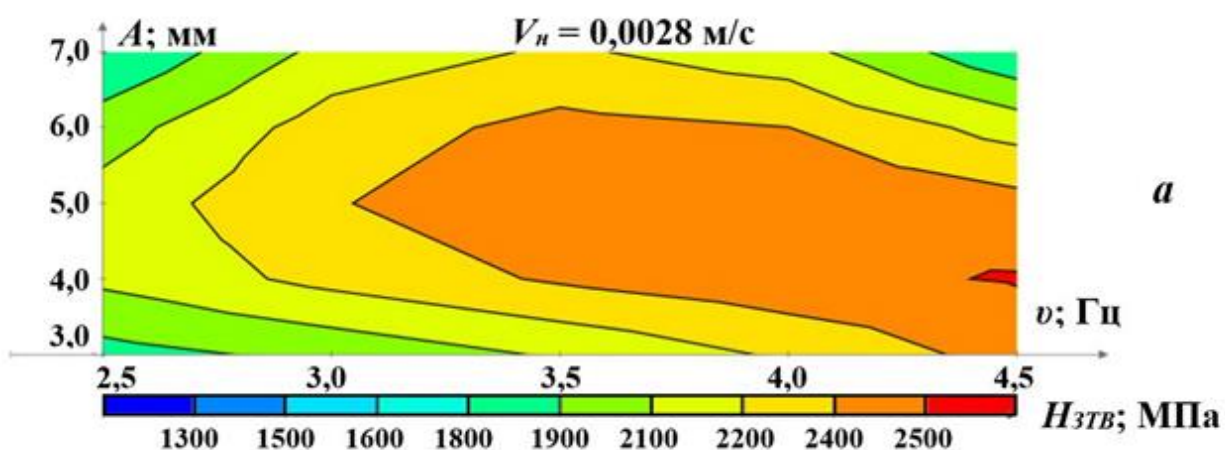


Рисунок В.2 – Графіки формування твердості металу ЗТВ $H_{ЗТВ}$ за зварювальним струмом $I_n = 125,0$ А: а – за $V_n = 0,0028$ м/с, б – за $V_n = 0,0039$ м/с, в – за $V_n = 0,005$ м/с, г – за $V_n = 0,0061$ м/с, д – за $V_n = 0,0072$ м/с



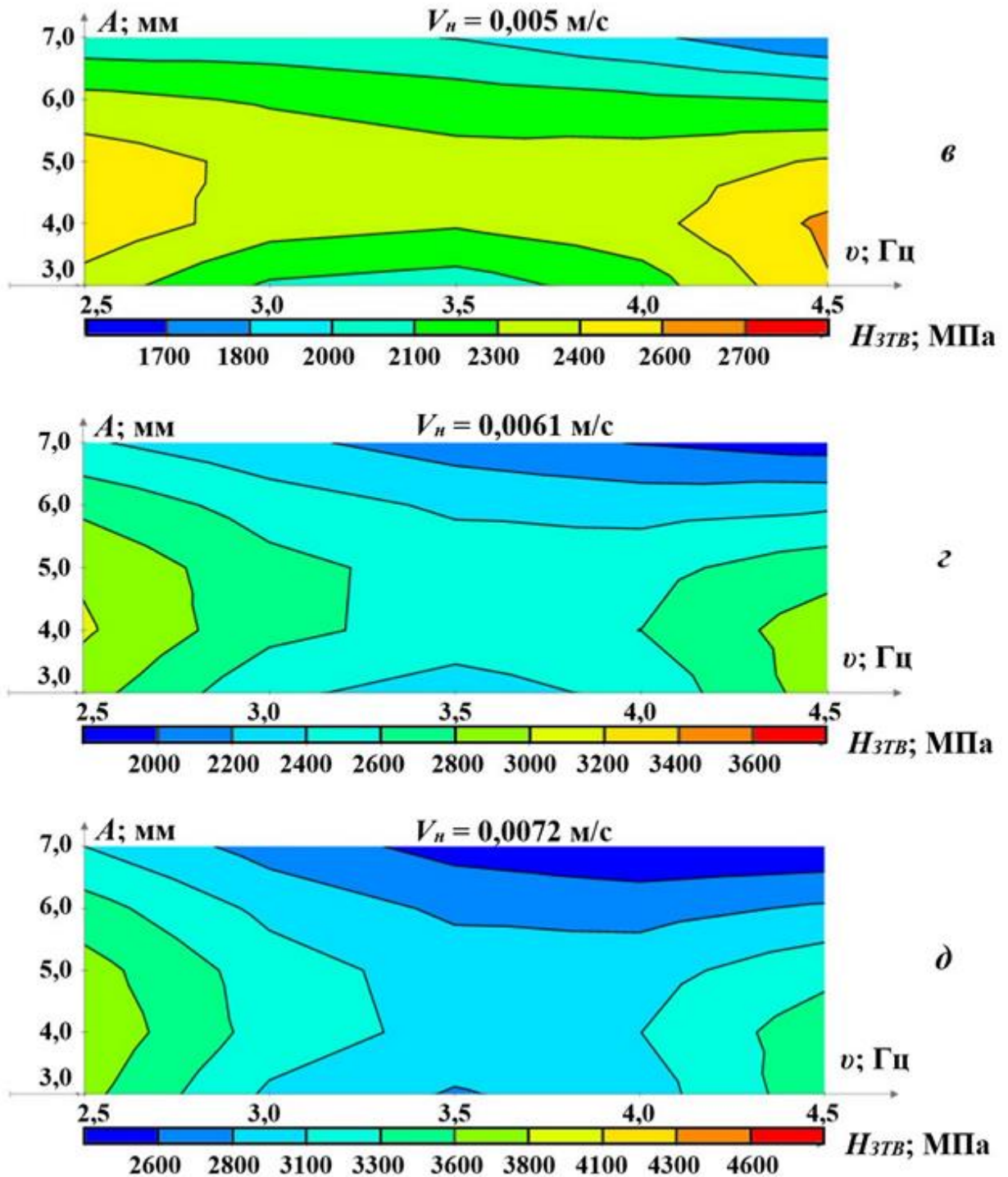
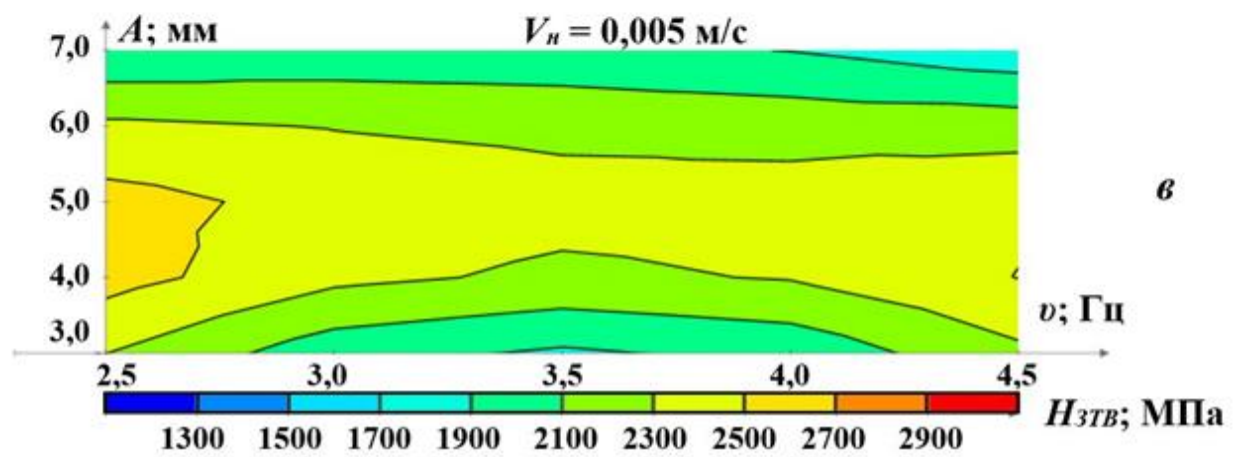
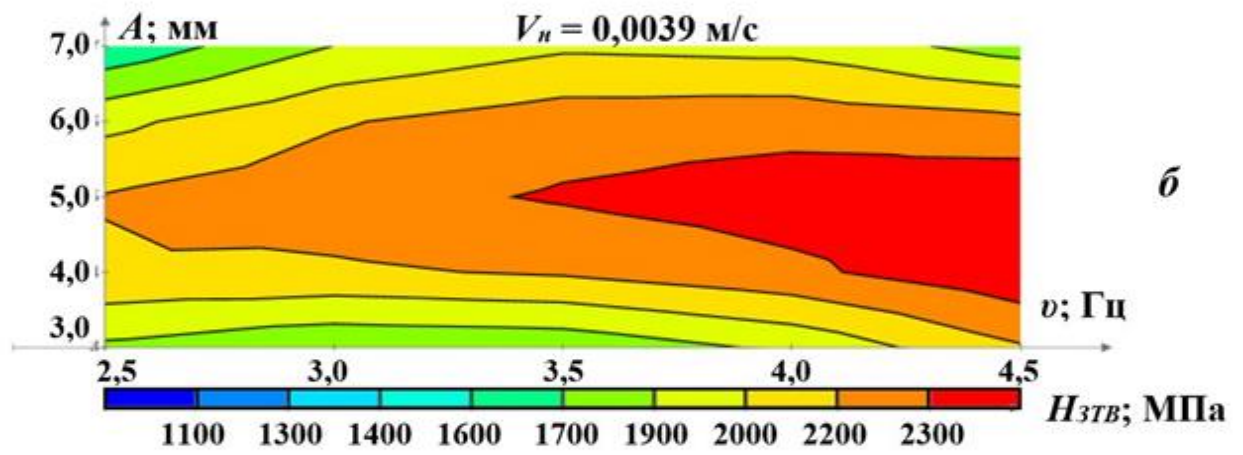
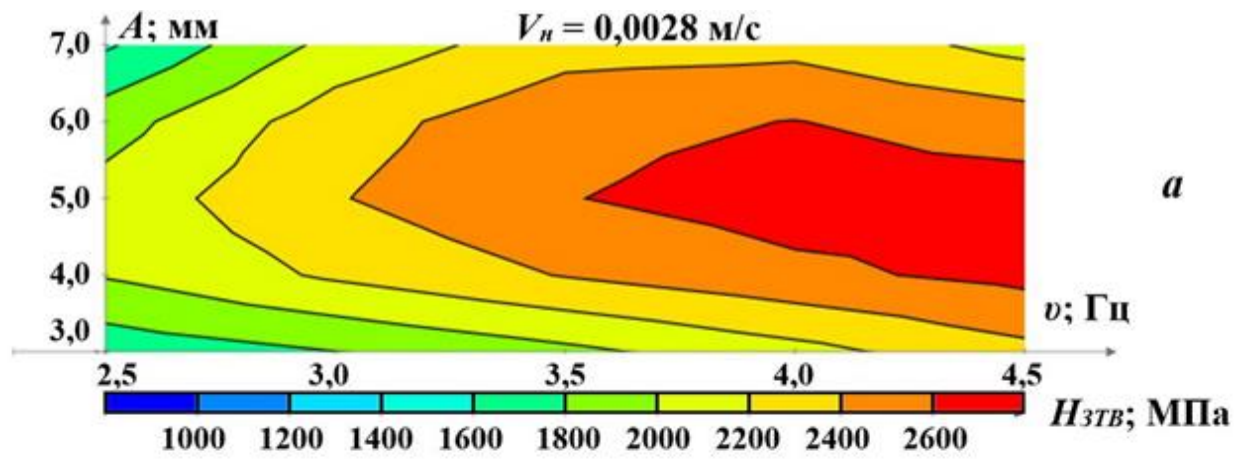


Рисунок В.3 – Графіки формування твердості металу ЗТВ $H_{ЗТВ}$ за зварювальним струмом $I_n = 150,0$ А: а – за $V_n = 0,0028$ м/с, б – за $V_n = 0,0039$ м/с, в – за $V_n = 0,005$ м/с, г – за $V_n = 0,0061$ м/с, д – за $V_n = 0,0072$ м/с



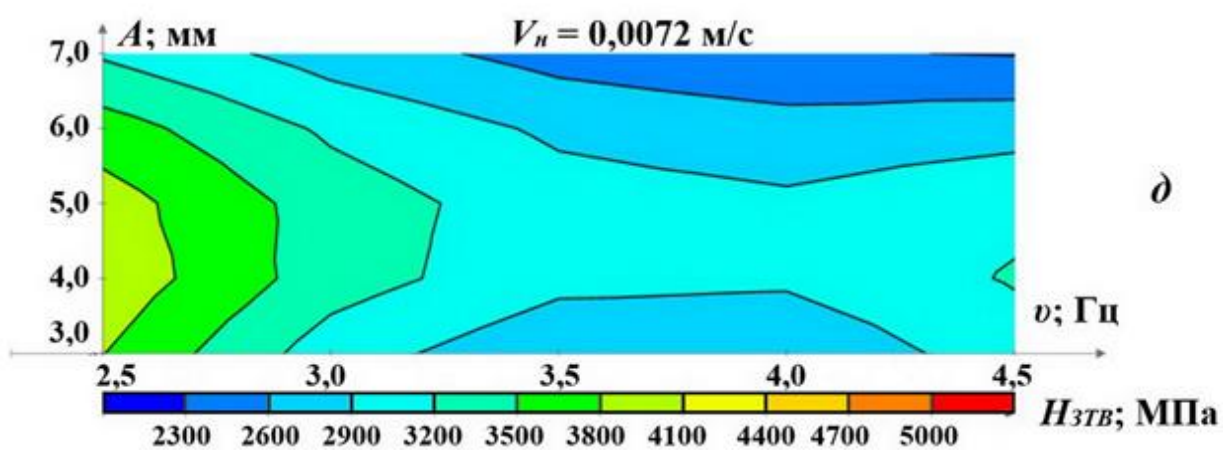
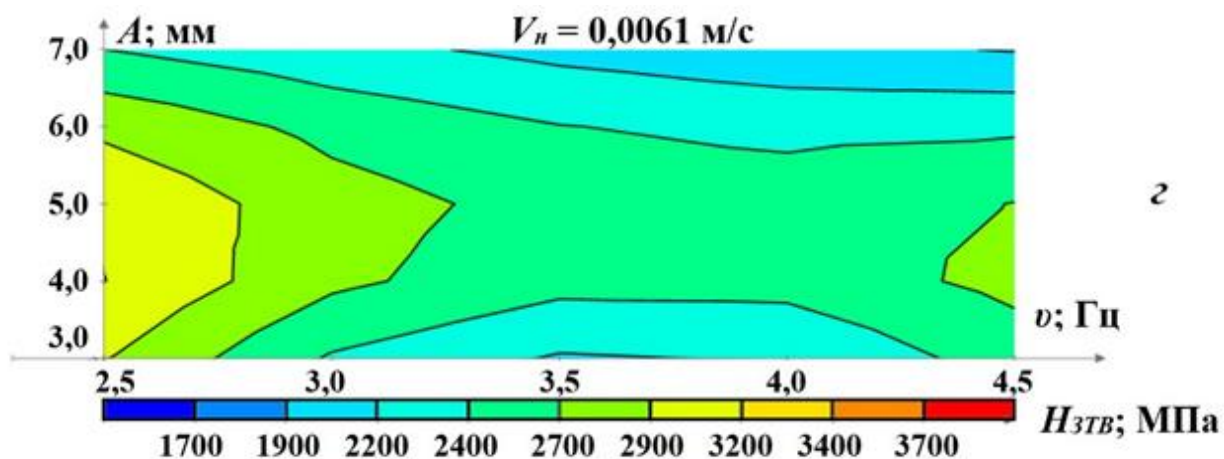
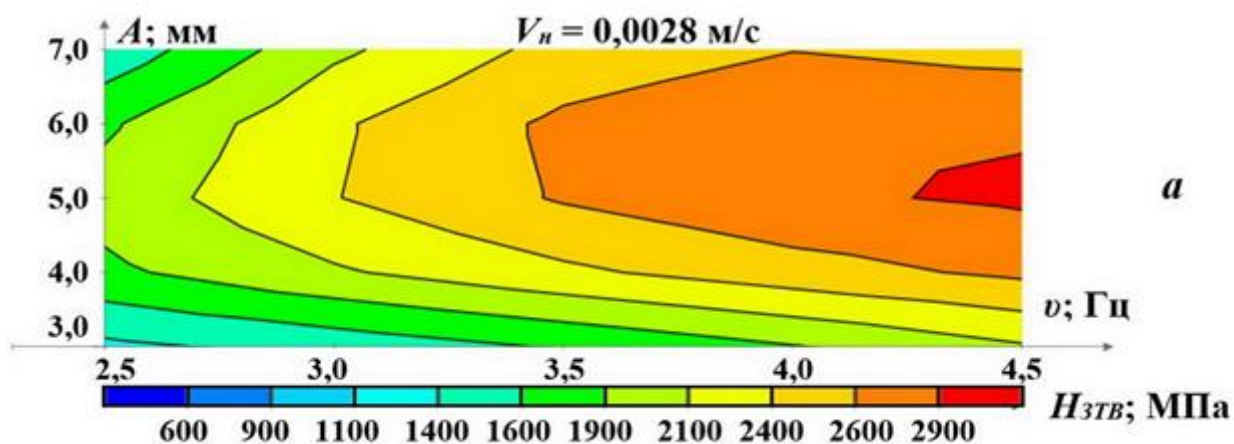
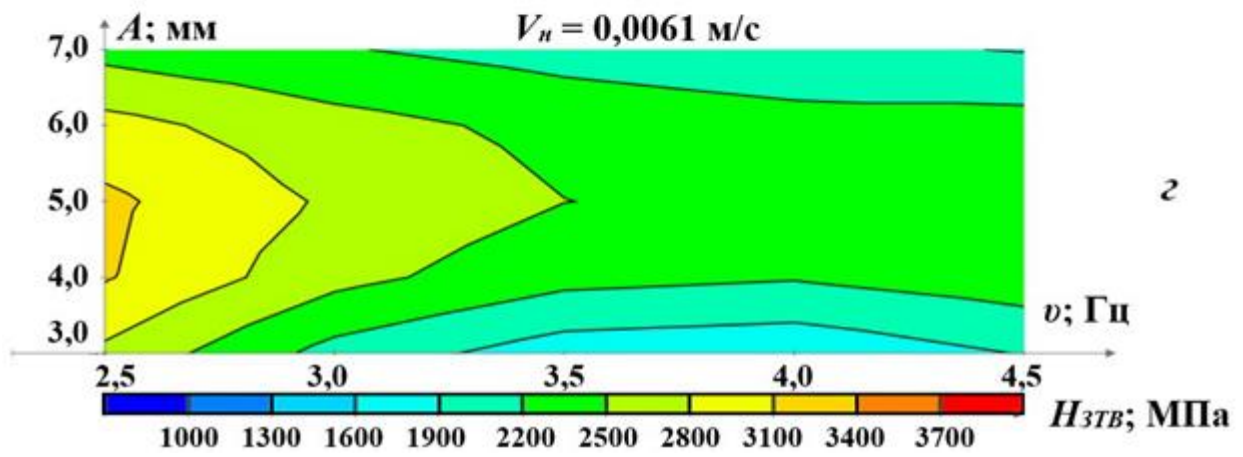
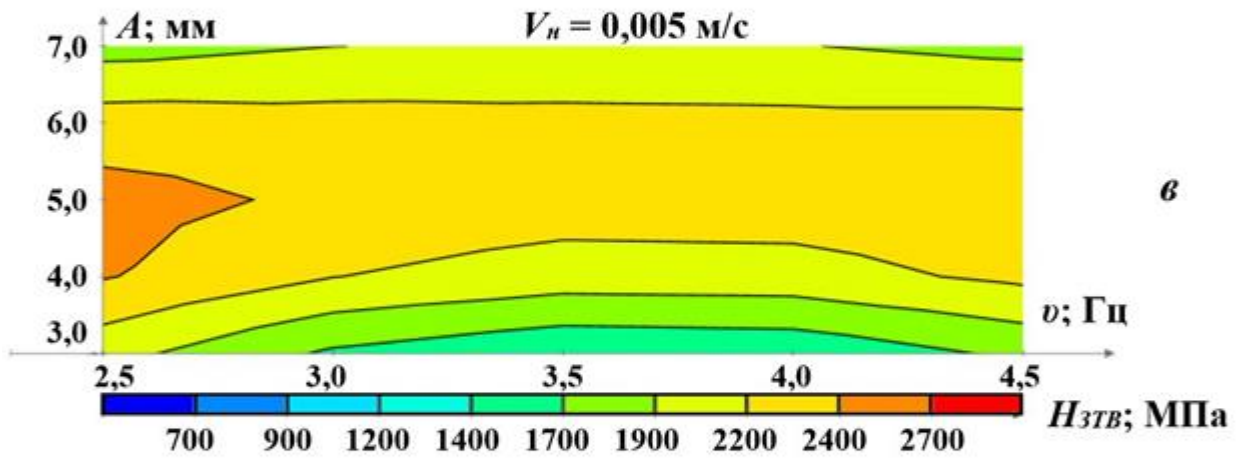
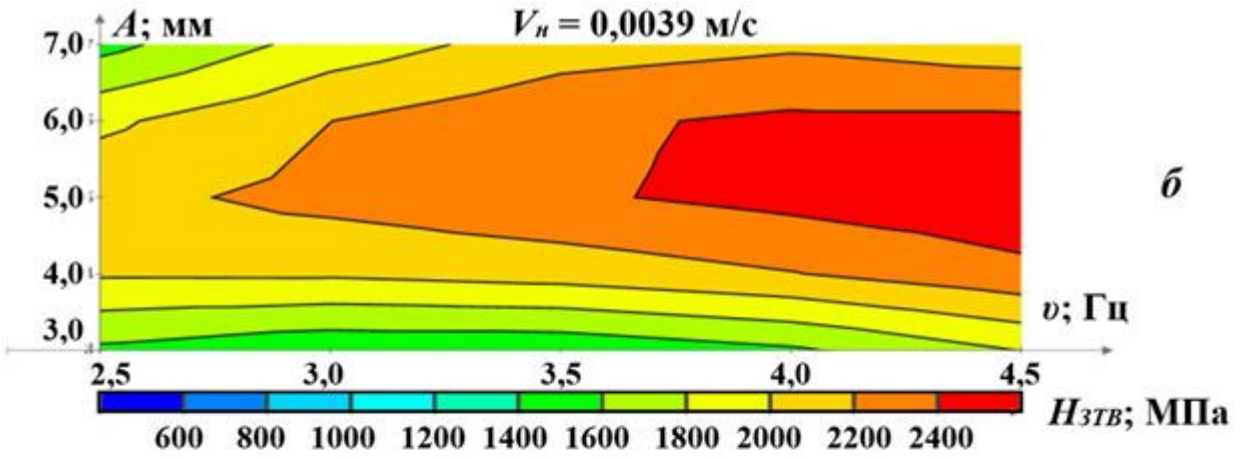


Рисунок В.4 – Графіки формування твердості металу ЗТВ $H_{зТВ}$ за зварювальним струмом $I_n = 175,0 \text{ А}$: а – за $V_n = 0,0028 \text{ м/с}$, б – за $V_n = 0,0039 \text{ м/с}$, в – за $V_n = 0,005 \text{ м/с}$, г – за $V_n = 0,0061 \text{ м/с}$, д – за $V_n = 0,0072 \text{ м/с}$





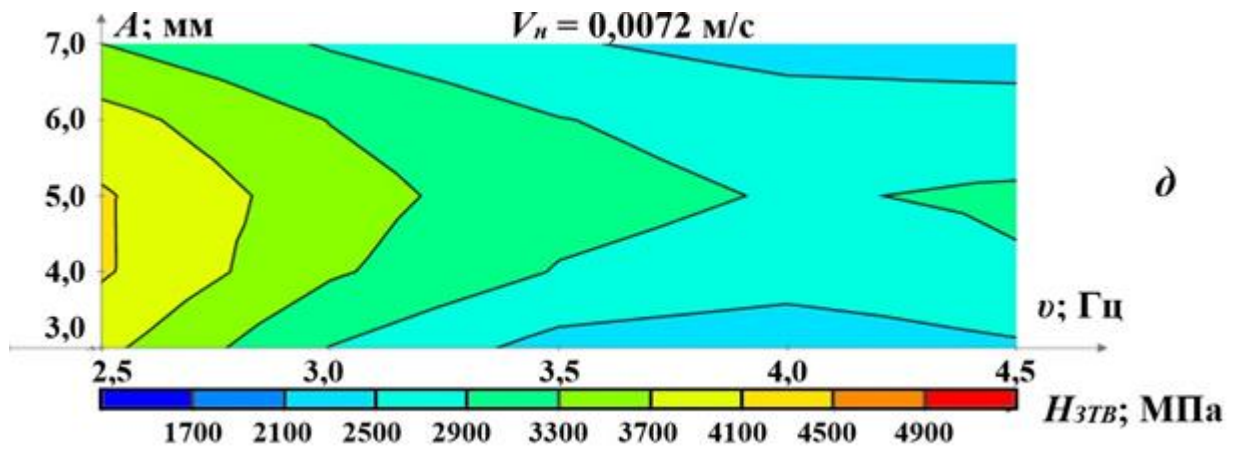
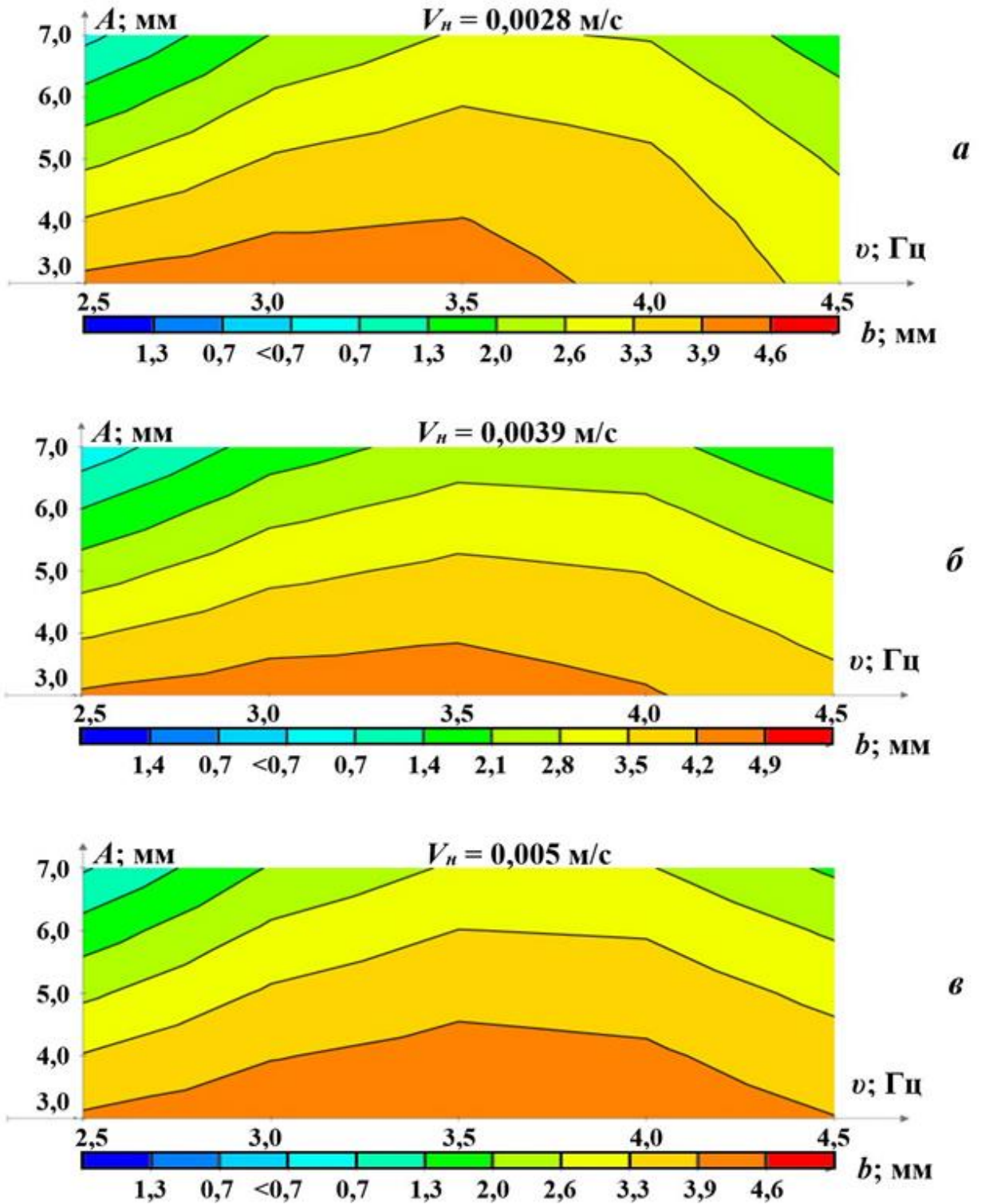


Рисунок В.5 – Графіки формування твердості металу ЗТВ $H_{ЗТВ}$ за зварювальним струмом $I_n = 200,0$ А: а – за $V_n = 0,0028$ м/с, б – за $V_n = 0,0039$ м/с, в – за $V_n = 0,005$ м/с, г – за $V_n = 0,0061$ м/с, д – за $V_n = 0,0072$ м/с

ДОДАТОК Г

Контурні графіки формування висоти наплавленого металу, що отримані за моделлю (4.9)



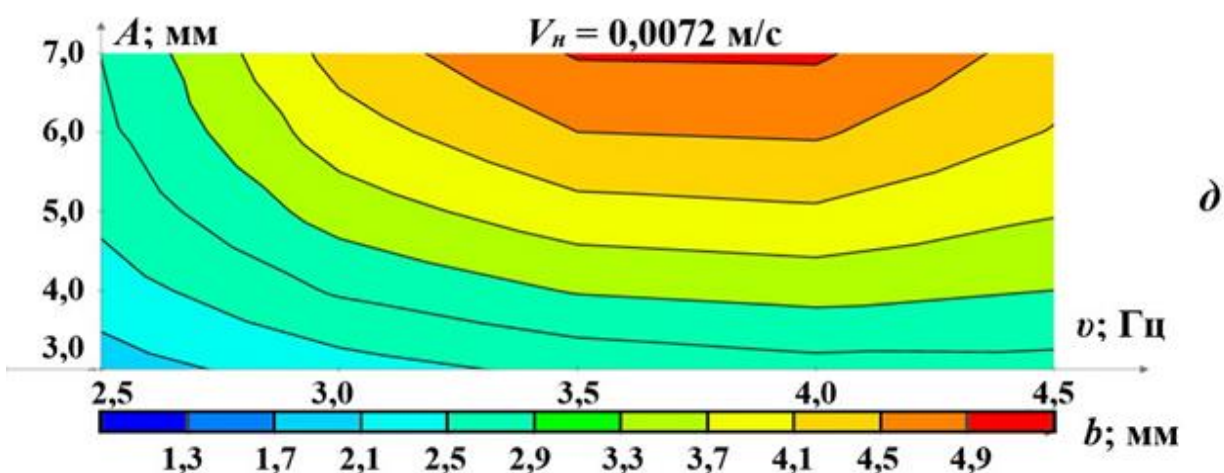
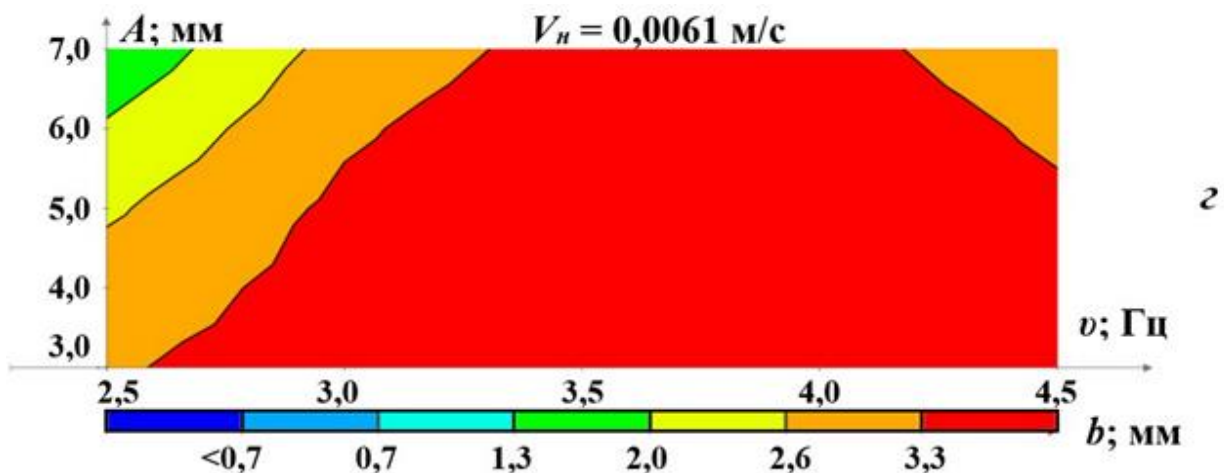
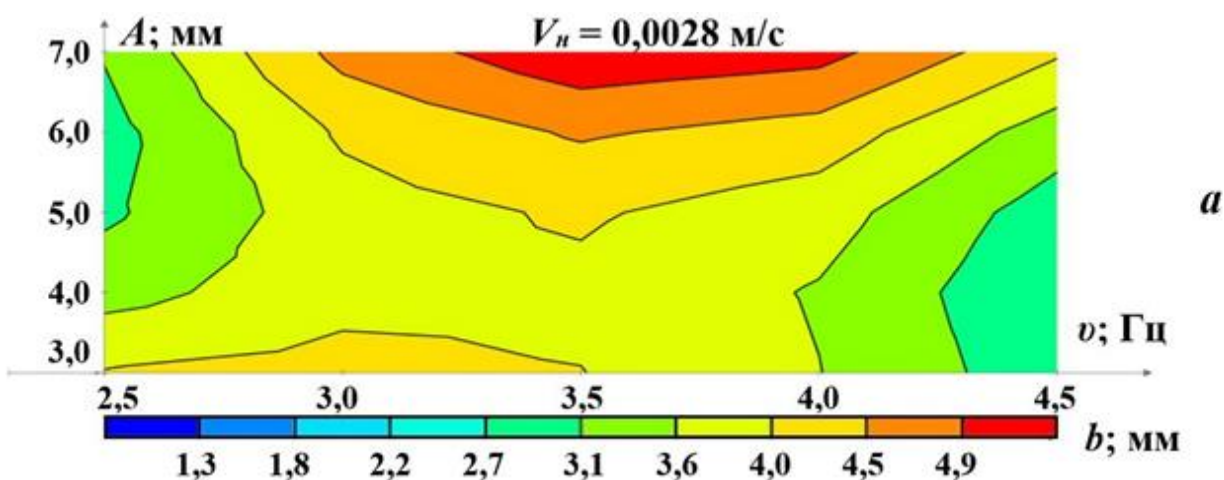
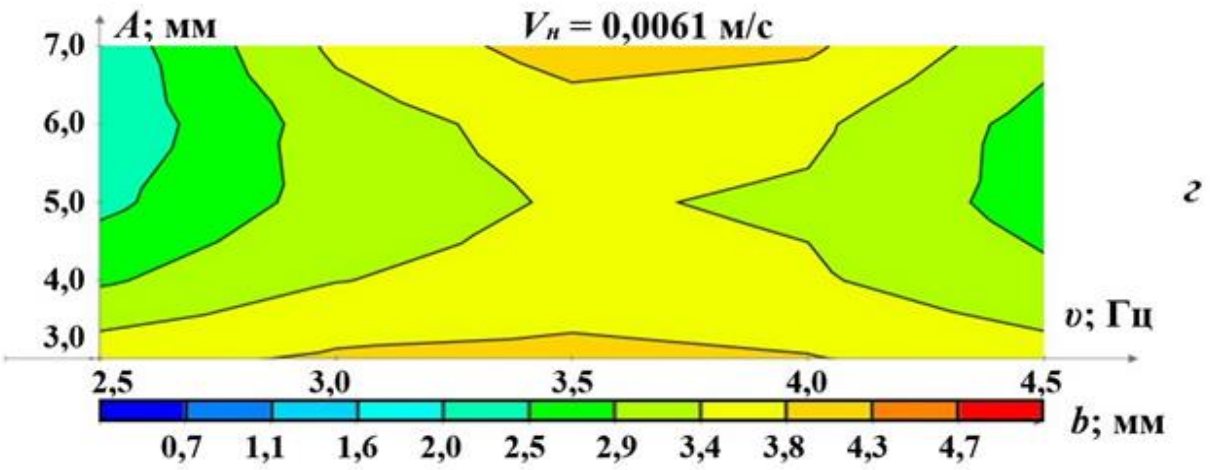
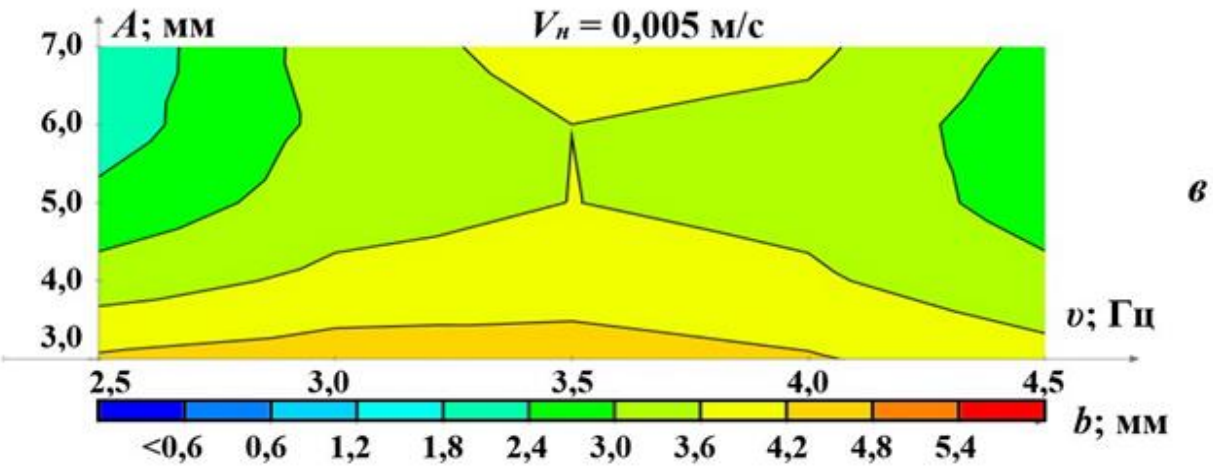
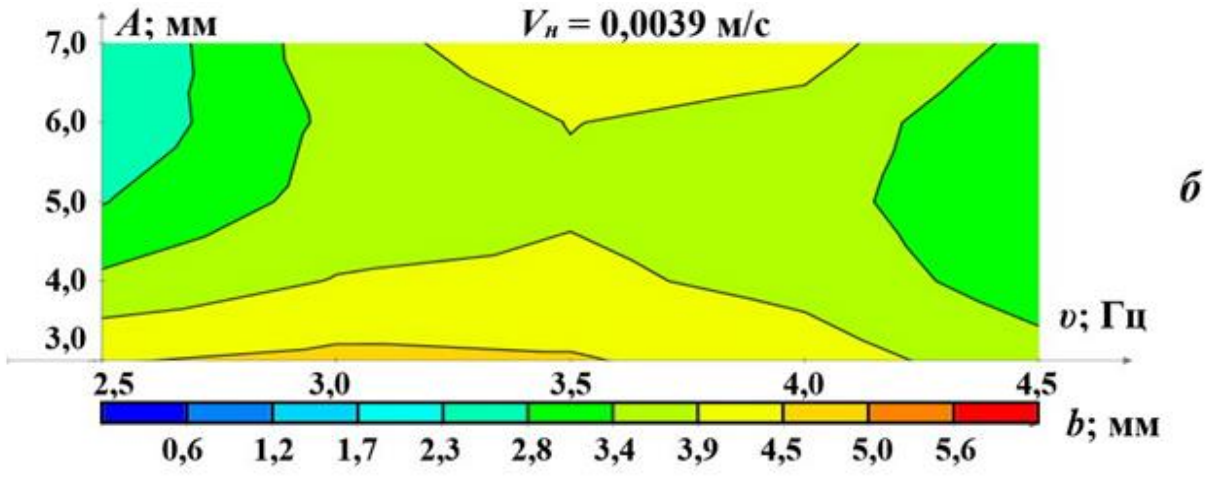


Рисунок Г.1 – Графіки формування висоти наплавленого металу b за зварювальним струмом $I_n = 100,0$ А: а – за $V_n = 0,0028$ м/с, б – за $V_n = 0,0039$ м/с, в – за $V_n = 0,005$ м/с, г – за $V_n = 0,0061$ м/с, д – за $V_n = 0,0072$ м/с





b

b

z

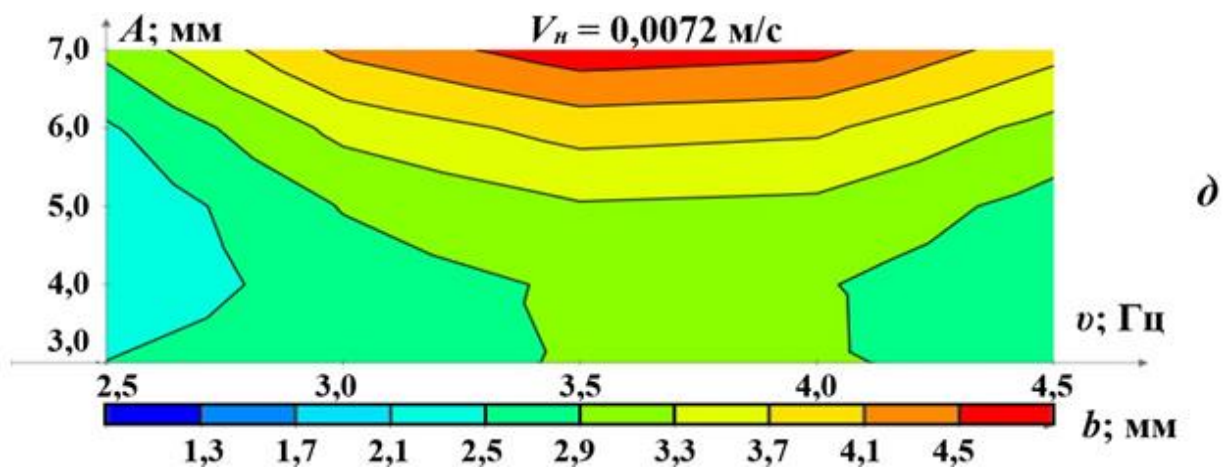
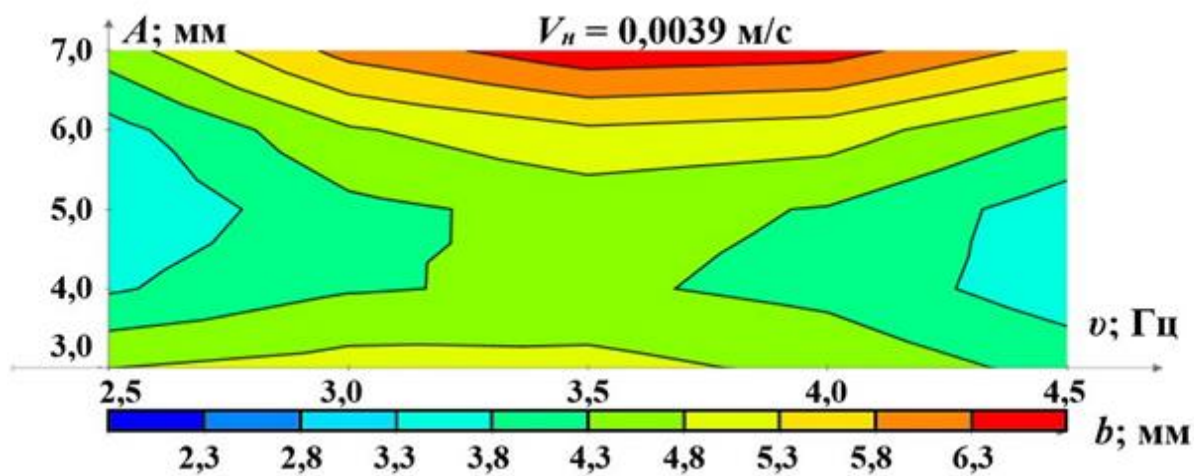
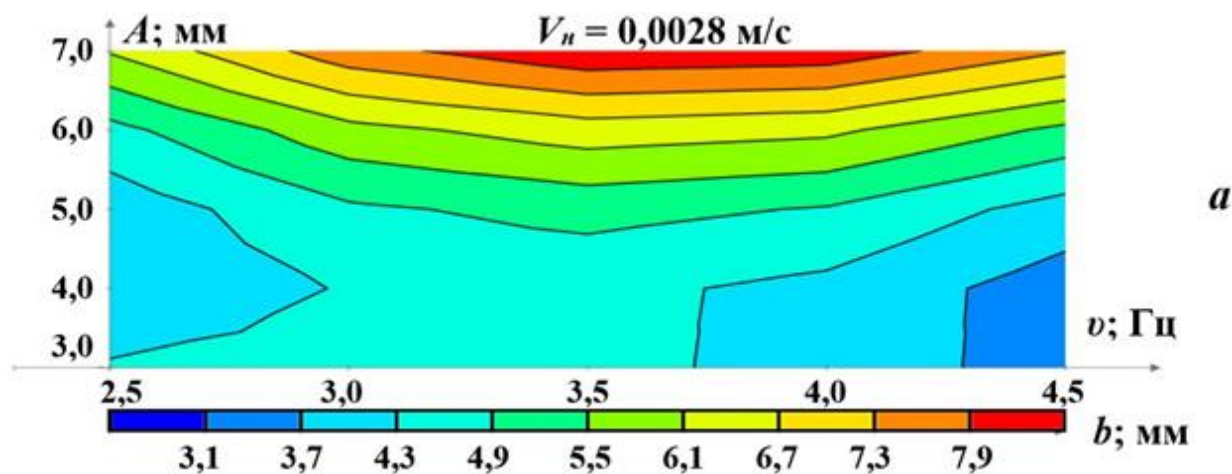


Рисунок Г.2 – Графіки формування висоти наплавленого металу b за зварювальним струмом $I_n = 125,0 \text{ А}$: а – за $V_n = 0,0028 \text{ м/с}$, б – за $V_n = 0,0039 \text{ м/с}$, в – за $V_n = 0,005 \text{ м/с}$, г – за $V_n = 0,0061 \text{ м/с}$, д – за $V_n = 0,0072 \text{ м/с}$



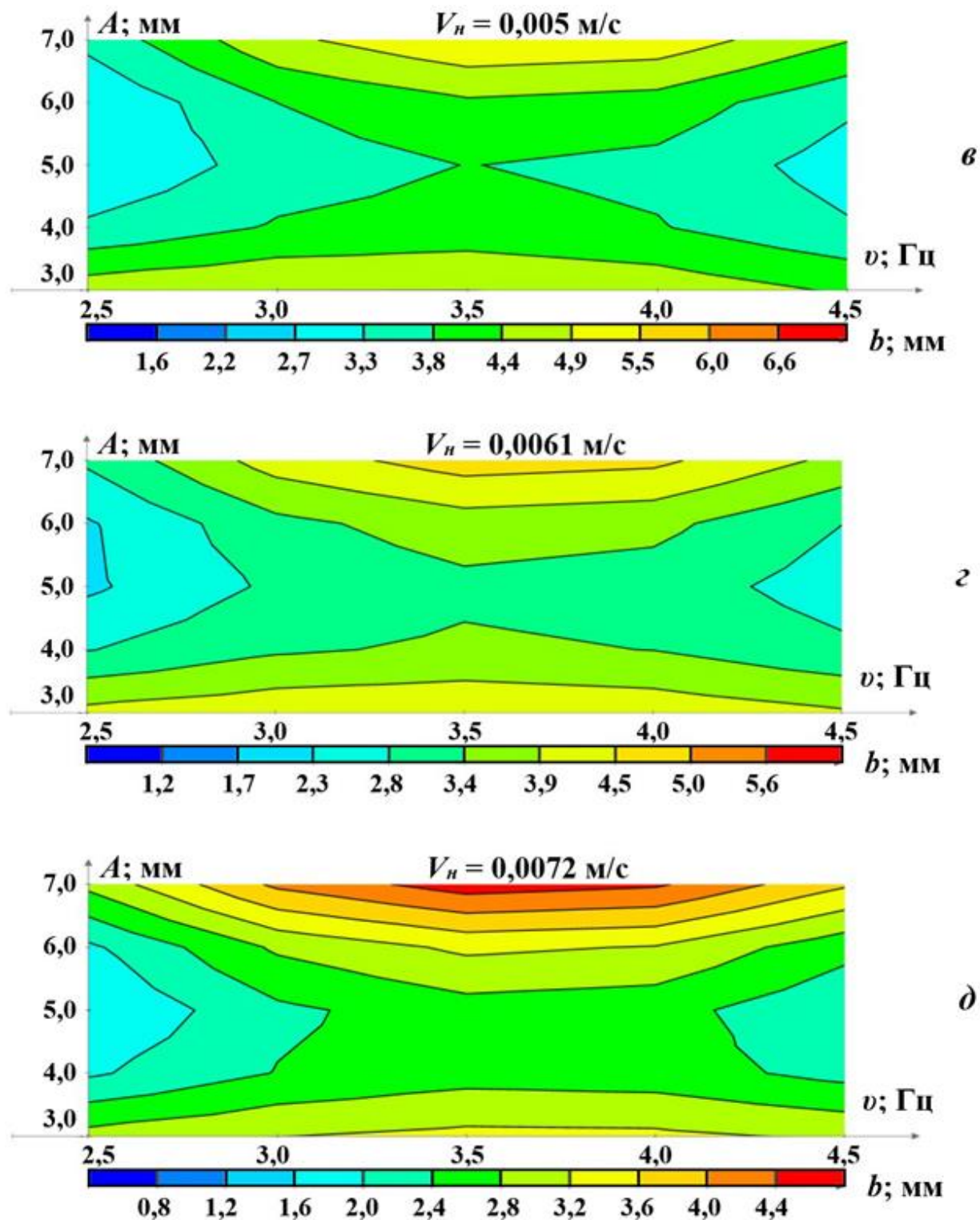
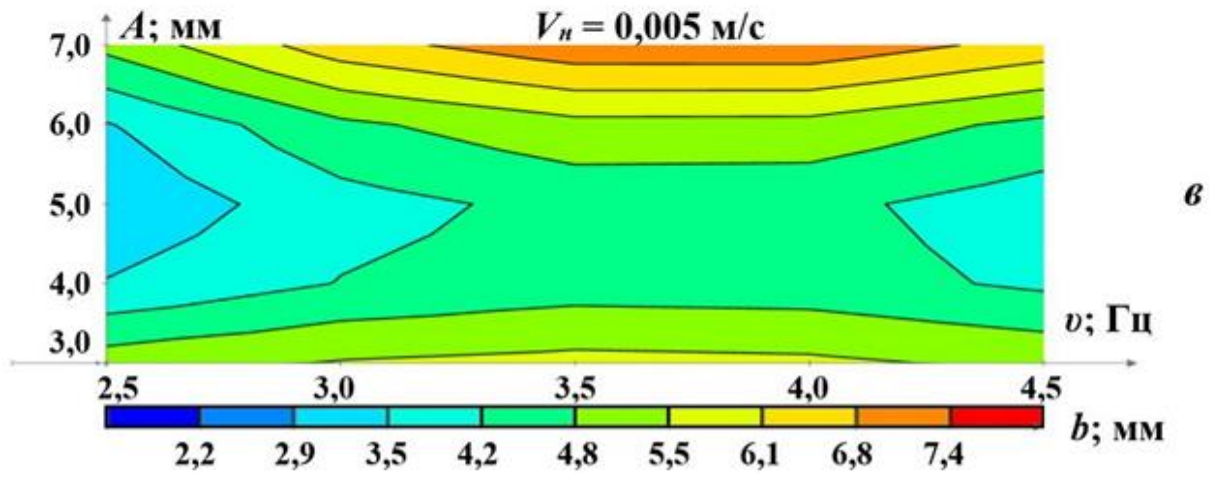
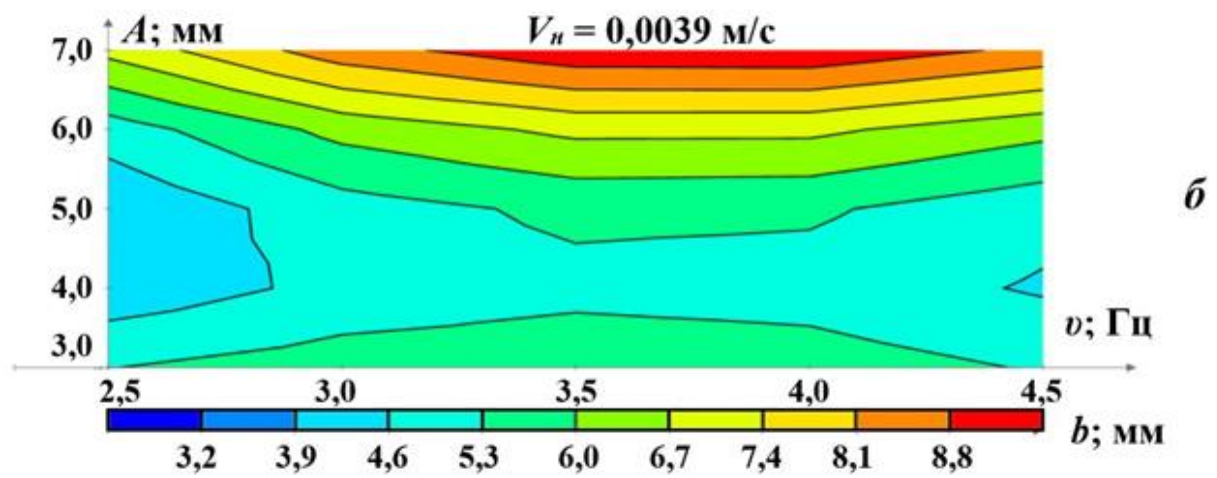
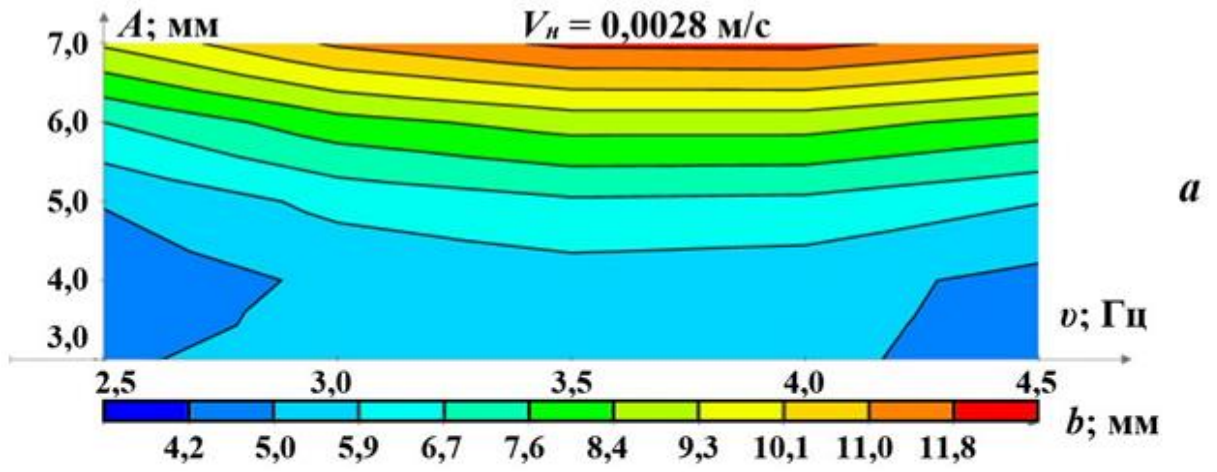


Рисунок Г.3 – Графіки формування висоти наплавленого металу b за зварювальним струмом $I_n = 150,0$ А: а – за $V_n = 0,0028$ м/с, б – за $V_n = 0,0039$ м/с, в – за $V_n = 0,005$ м/с, г – за $V_n = 0,0061$ м/с, д – за $V_n = 0,0072$ м/с



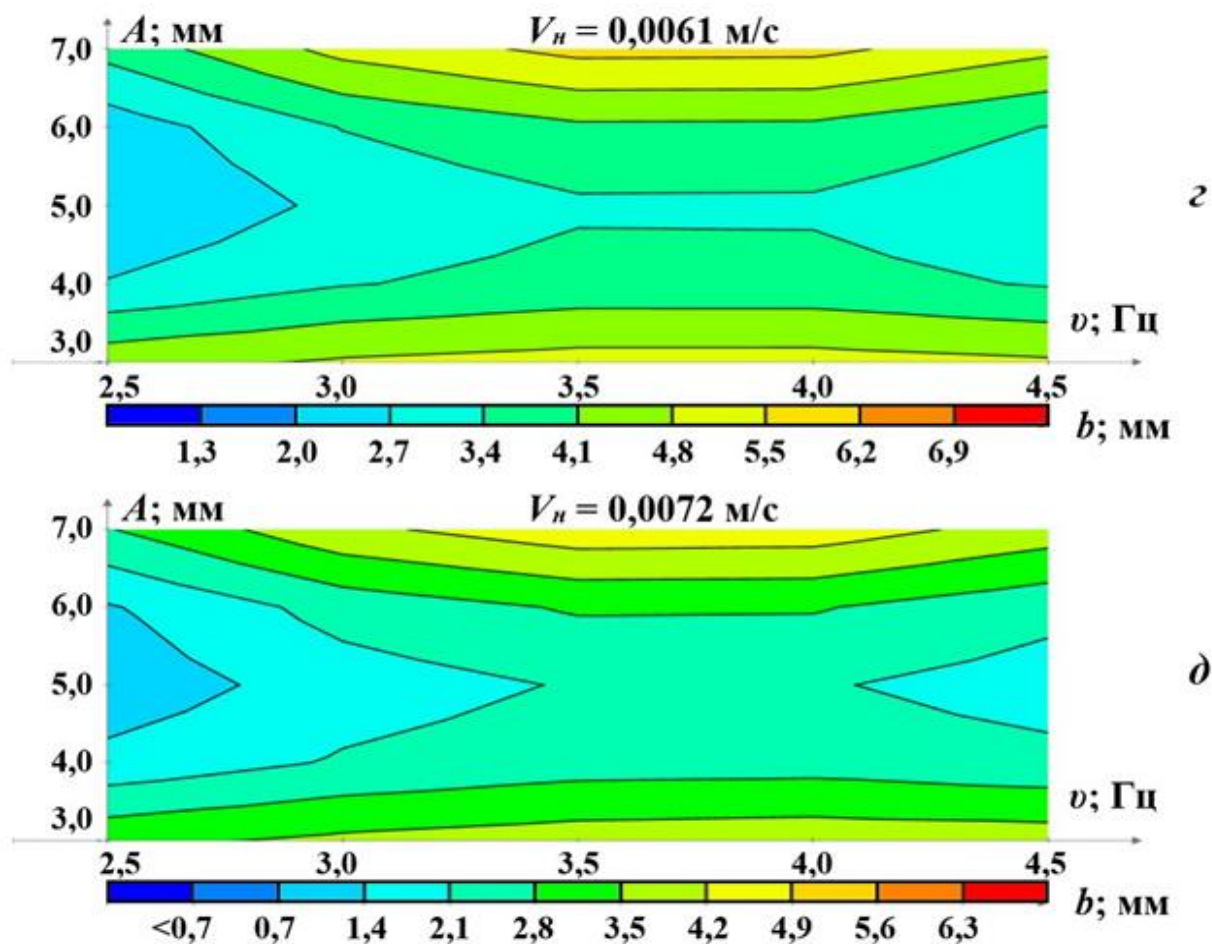
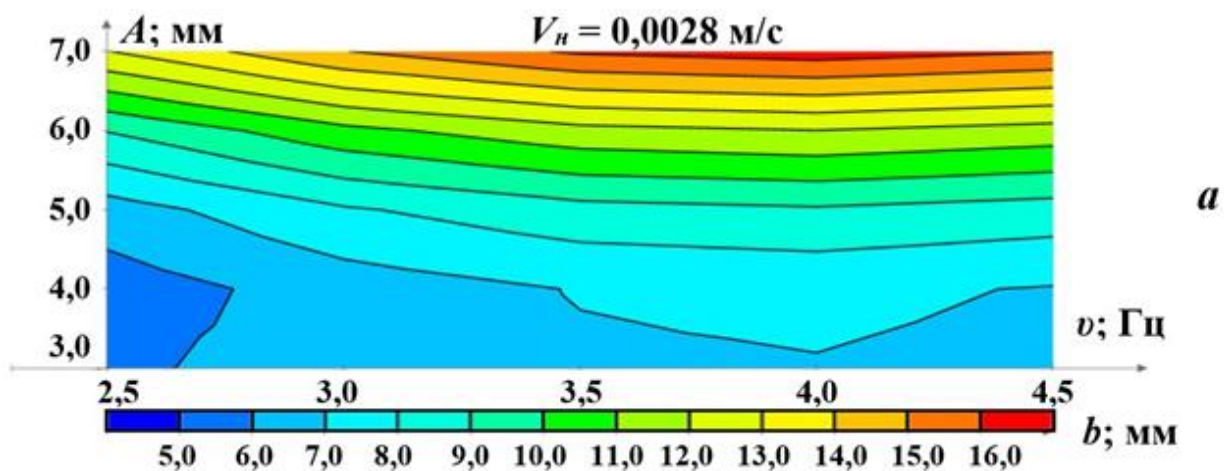
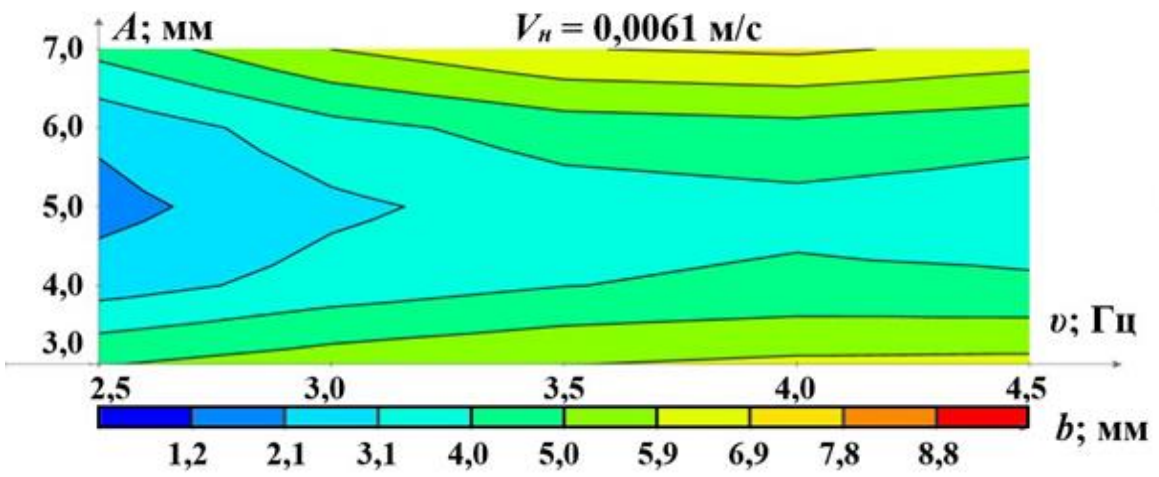
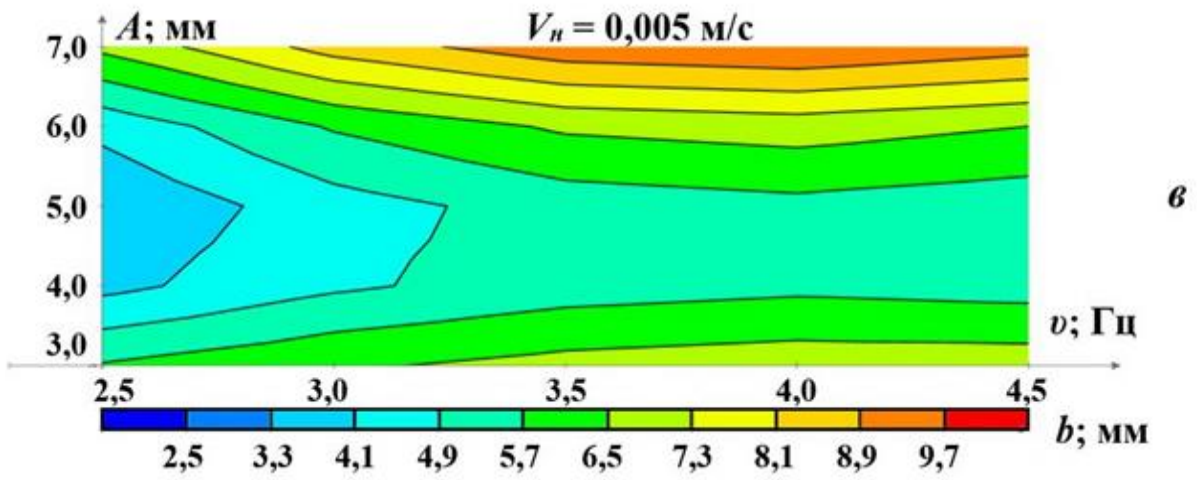
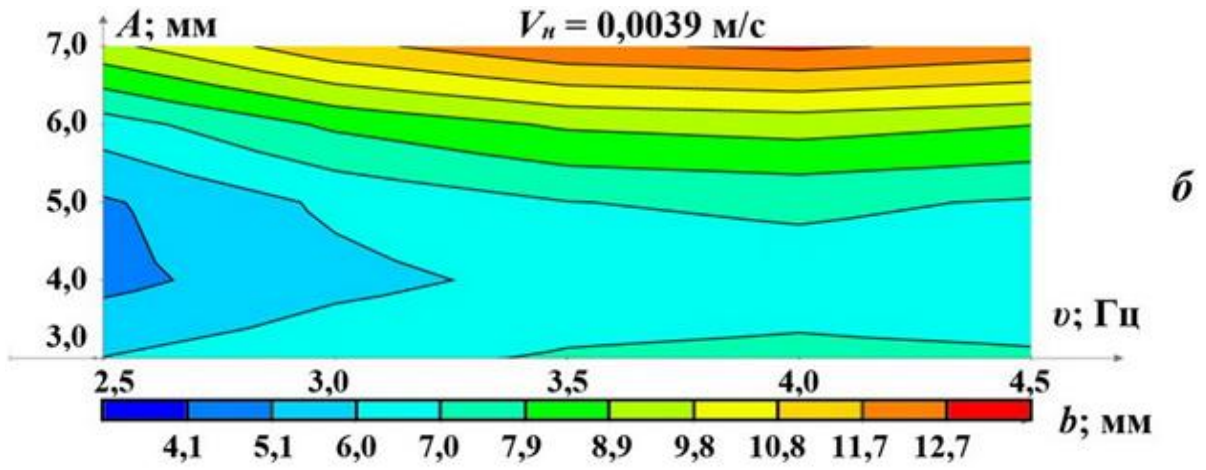


Рисунок Г.4 – Графіки формування висоти наплавленого металу b за зварювальним струмом $I_n = 175,0$ А: а – за $V_n = 0,0028$ м/с, б – за $V_n = 0,0039$ м/с, в – за $V_n = 0,005$ м/с, г – за $V_n = 0,0061$ м/с, д – за $V_n = 0,0072$ м/с





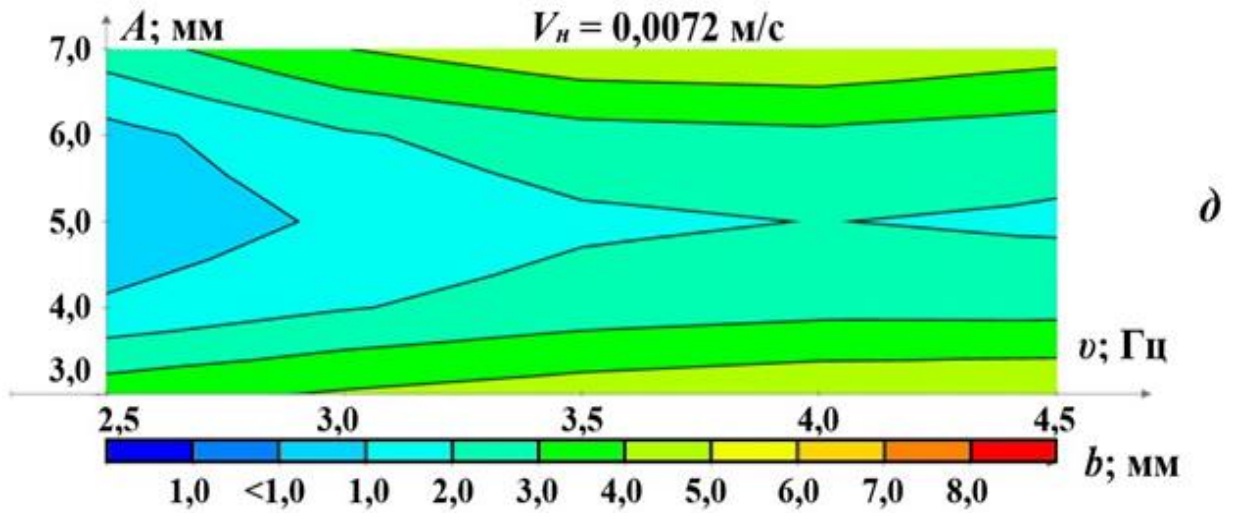


Рисунок Г.5 – Графіки формування висоти наплавленого металу b за зварювальним струмом $I_n = 200,0 \text{ А}$: а – за $V_n = 0,0028 \text{ м/с}$, б – за $V_n = 0,0039 \text{ м/с}$, в – за $V_n = 0,005 \text{ м/с}$, г – за $V_n = 0,0061 \text{ м/с}$, д – за $V_n = 0,0072 \text{ м/с}$

ДОДАТОК Д

**Таблиці щодо визначення оптимального режиму наплавлення з
коливаннями зварювальної ванни**

Таблиця Д.1 – Середні значення ширини наплавленого валику виміряні $W_{вим}^{CP}$ та розраховані $W_{роз}^{CP}$ що визначалися за методом Протод'яконова

Фактор	Значення фактору	Значення ширини валику $W_{вим}$ ($W_{роз}$), мм	Середнє значення, $W_{вим}^{CP}$ ($W_{роз}^{CP}$), мм
Сила струму наплавлення I_n , А	100,0	9,0 (10,96)	13,4 (12,7)
		13,0 (10,3)	
		16,0 (13,6)	
		19,0 (18,8)	
		10,0 (9,6)	
	125,0	16,0 (12,4)	13,8 (14,52)
		19,0 (17,2)	
		7,0 (13,2)	
		10,0 (11,8)	
		15,0 (18,0)	
	150,0	19,0 (15,8)	13,4 (14,52)
		8,0 (10,8)	
		10,0 (13,8)	
		14,0 (14,3)	
		20,0 (17,9)	
	175,0	7,0 (11,7)	13,6 (12,84)
		11,0 (15,4)	
		13,0 (14,0)	
		18,0 (14,1)	
		24,0 (9,0)	
200,0	13,0 (15,7)	13,6 (15,12)	
	18,0 (15,8)		
	20,0 (19,0)		
	7,0 (11,3)		
	11,0 (13,8)		
Швидкість наплавлення V_n , м/с	0,0028	12,0 (15,7)	13,4 (16,2)
		11,0 (15,4)	
		9,0 (13,2)	
		19,0 (18,8)	
		16,0 (17,9)	
	0,0039	7,0 (11,7)	14,0 (14,12)
		18,0 (17,2)	
		16,0 (13,6)	
		16,0 (14,3)	
	0,005	13,0 (13,8)	13,6 (13,4)
	16,0 (15,8)		

		15,0 (15,8)		
		14,0 (14,0)		
		13,0 (11,8)		
		10,0 (9,6)		
	0,0061	9,0 (10,96)		13,6 (14,6)
		8,0 (10,8)		
		18,0 (19,0)		
		18,0 (14,1)		
		15,0 (18,0)		
	0,0072	14,0 (12,4)		13,2 (11,36)
		13,0 (10,3)		
		11,0 (13,8)		
		10,0 (11,3)		
		18,0 (9,0)		
	Частота коливань ν, Гц	2,5		16,0 (15,8)
14,0 (12,4)				
12,0 (15,7)				
9,0 (10,96)				
7,0 (11,7)				
3,0		18,0 (17,2)	13,0 (13,9)	
		15,0 (15,8)		
		13,0 (10,3)		
		11,0 (15,4)		
		8,0 (10,8)		
3,5		18,0 (19,0)	13,6 (14,7)	
		16,0 (13,6)		
		14,0 (14,0)		
		11,0 (13,8)		
		9,0 (13,2)		
4,0		19,0 (18,8)	15,2 (14,06)	
		18,0 (14,1)		
		16,0 (14,3)		
		13,0 (11,8)		
		10,0 (11,3)		
4,5		18,0 (9,0)	14,4 (13,66)	
		16,0 (17,9)		
		15,0 (18,0)		
		13,0 (13,8)		
	10,0 (9,6)			
Амплітуда коливань A, м	0,003	7,0 (11,7)	8,8 (11,32)	
		8,0 (10,8)		
		9,0 (13,2)		
		10,0 (11,3)		
		10,0 (9,6)		
	0,004	9,0 (10,96)	11,2 (13,2)	
		11,0 (15,4)		
		11,0 (13,8)		
		13,0 (11,8)		
		13,0 (13,8)		

	0,005	12,0 (15,7)	14,0 (14,5)
		13,0 (10,3)	
		14,0 (14,0)	
		16,0 (14,3)	
		15,0 (18,0)	
	0,006	14,0 (12,4)	15,8 (14,76)
		15,0 (15,8)	
		16,0 (13,6)	
		18,0 (14,1)	
		16,0 (17,9)	
	0,007	16,0 (15,8)	17,8 (16,0)
		18,0 (17,2)	
		18,0 (19,0)	
		19,0 (18,8)	
		18,0 (9,0)	

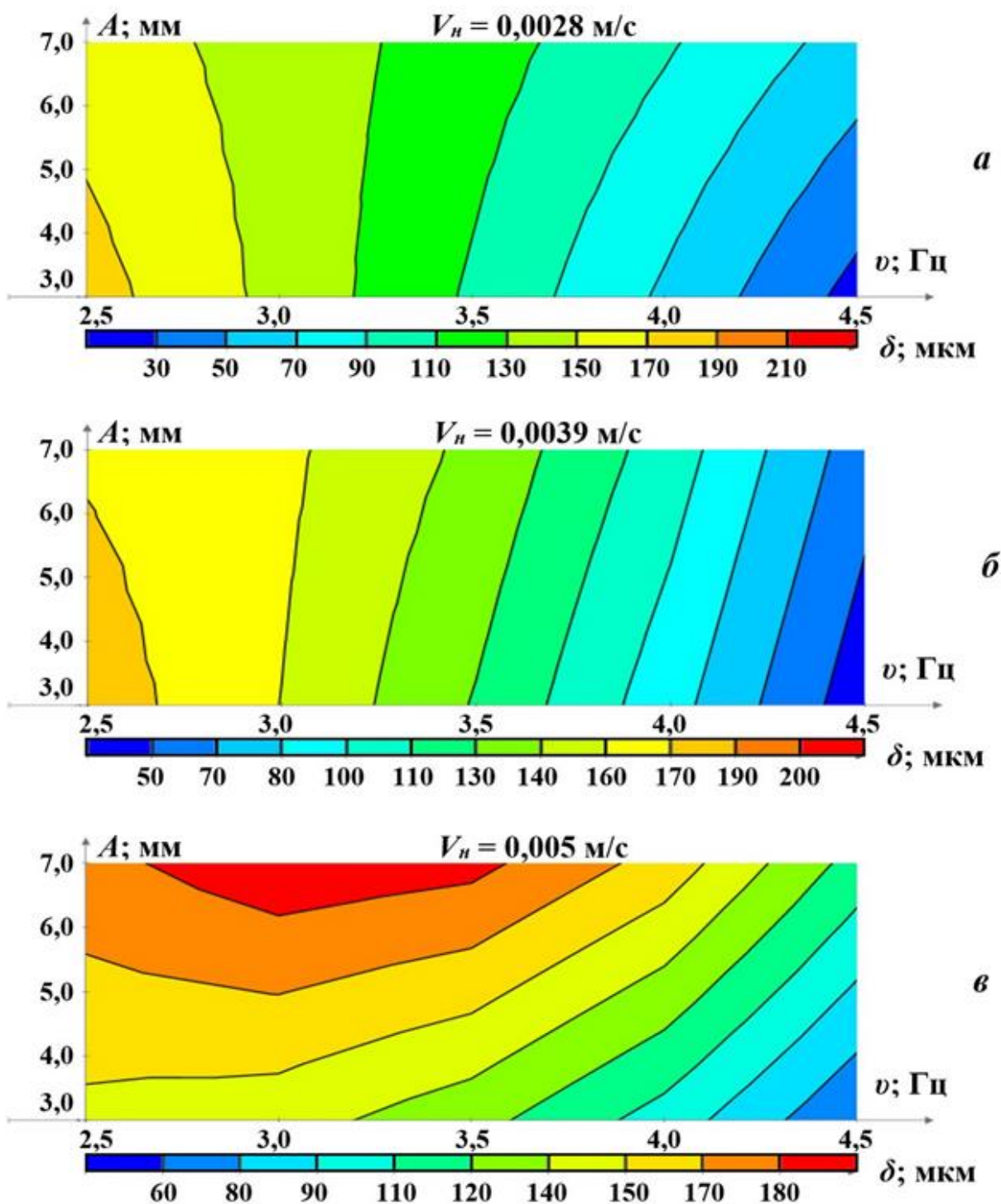
Таблиця Д.2 – Значення максимальних значень твердості наплавленого металу H та ЗТВ $H_{ЗТВ}$, що отримані за критеріями: отримання максимальної ширини наплавленого валику, тобто у діапазоні амплітуд 0,006 м - 0,007 м; отримання низького значення висоти наплавленого валику, тобто за частот у діапазонах 2,5 Гц – 3,0 Гц та 4,0 Гц - 4,5 Гц

Сила струму наплавлення I_n , А	Швидкість наплавлення V_n , м/с	Максимальне значення твердості наплавленого металу H , МПа	Максимальне значення твердості ЗТВ $H_{ЗТВ}$, МПа	Різниця значень H та $H_{ЗТВ}$, МПа
100,0	0,0028	2700,0	2700,0	0
	0,0039	2600,0	2500,0	100,0
	0,005	2600,0	2500,0	100,0
	0,0061	2600,0	2600,0	0
	0,0072	2800,0	2800,0	0
125,0	0,0028	2400,0	2400,0	0
	0,0039	2400,0	2200,0	200,0
	0,005	2400,0	2400,0	0
	0,0061	2600,0	2700,0	100,0
	0,0072	2800,0	3200,0	400,0
150,0	0,0028	2400,0	2400,0	0
	0,0039	2200,0	2200,0	0
	0,005	2400,0	2400,0	0
	0,0061	2600,0	2800,0	200,0
	0,0072	2900,0	3600,0	700,0
175,0	0,0028	2600,0	2600,0	0
	0,0039	2400,0	2300,0	100,0
	0,005	2300,0	2300,0	0
	0/0061	2700,0	2900,0	200,0

	0,0072	3100,0	380,0	700,0
200,0	0,0028	2800,0	2900,0	100,0
	0,0039	2600,0	2600,0	0
	0,005	2400,0	2400,0	0
	0/0061	2700,0	3100,0	400,0
	0,0072	3200,0	4100,0	900,0

ДОДАТОК Е

Контурні графіки формування розміру кристаліту, що отримані за моделлю
(4.10)



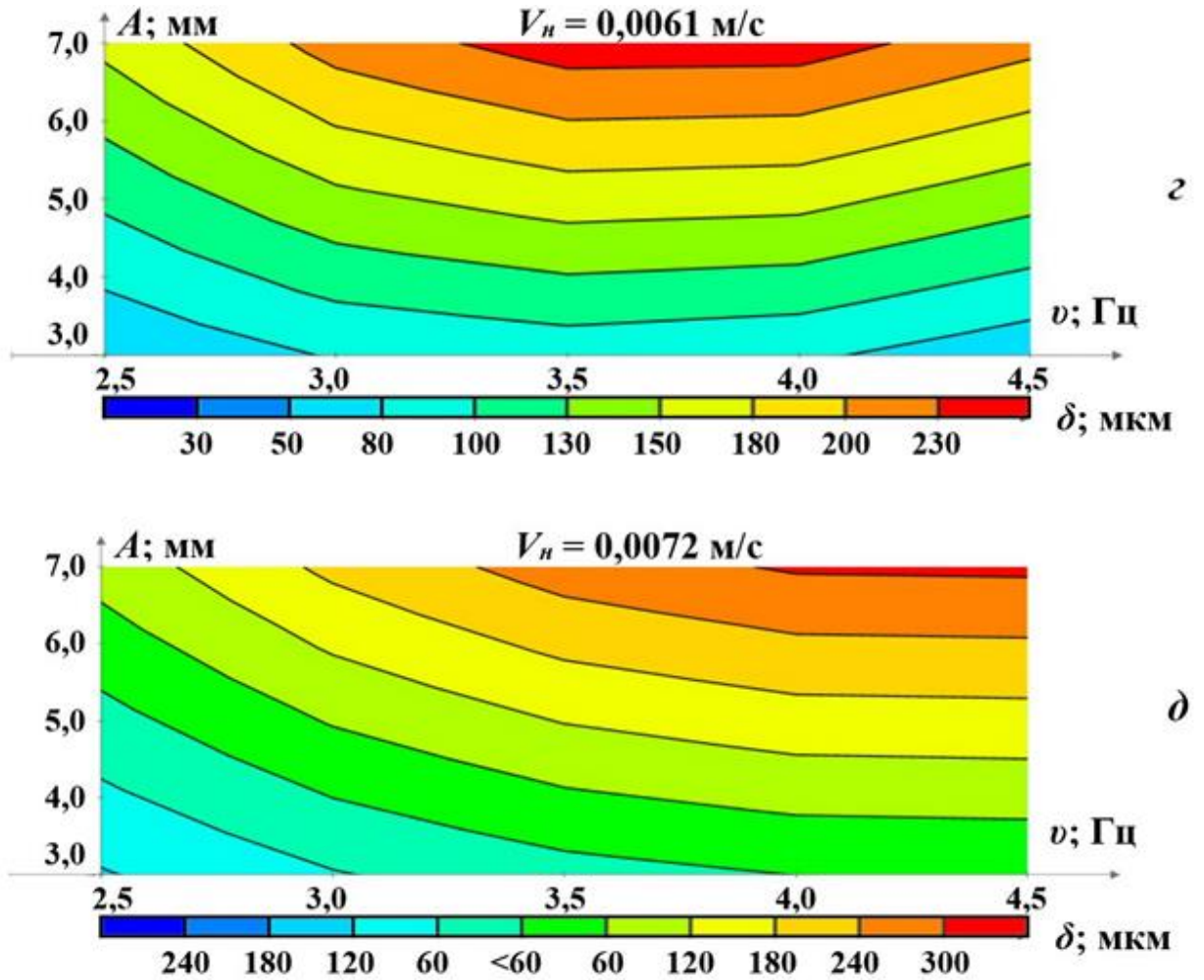
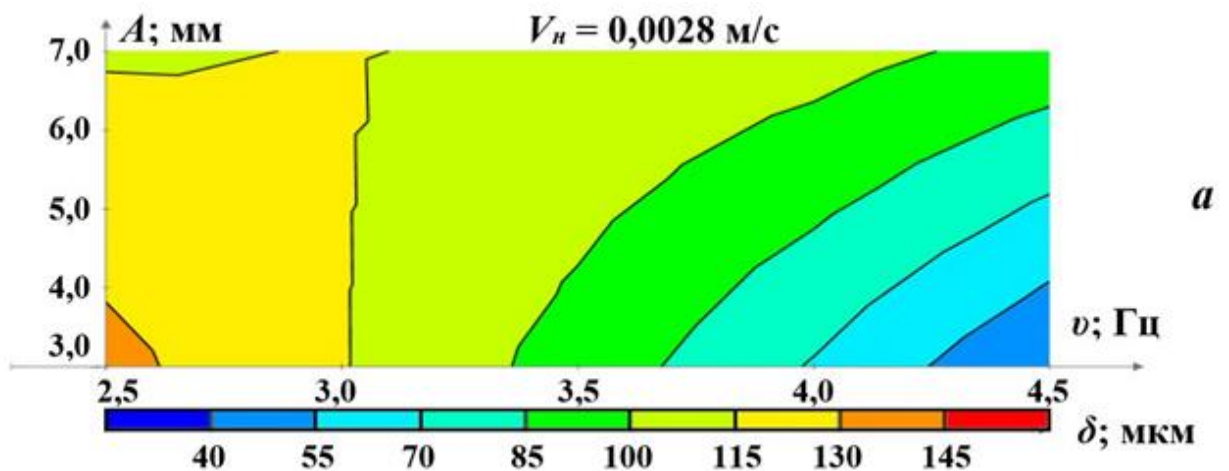
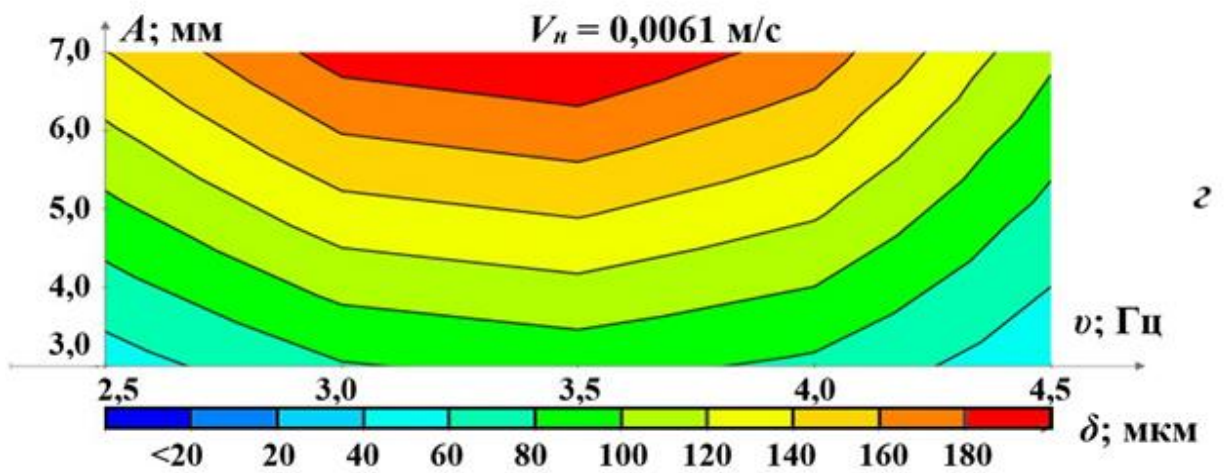
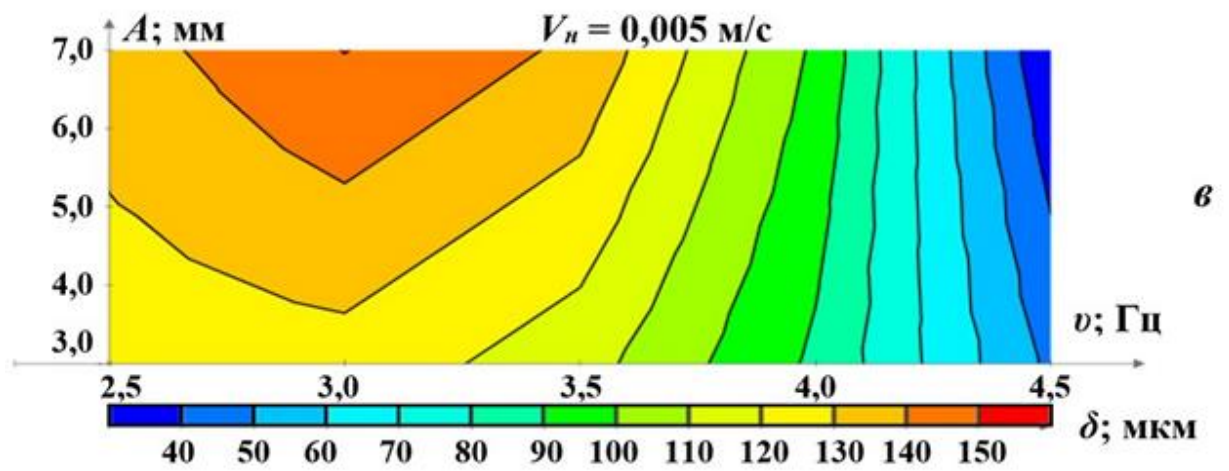
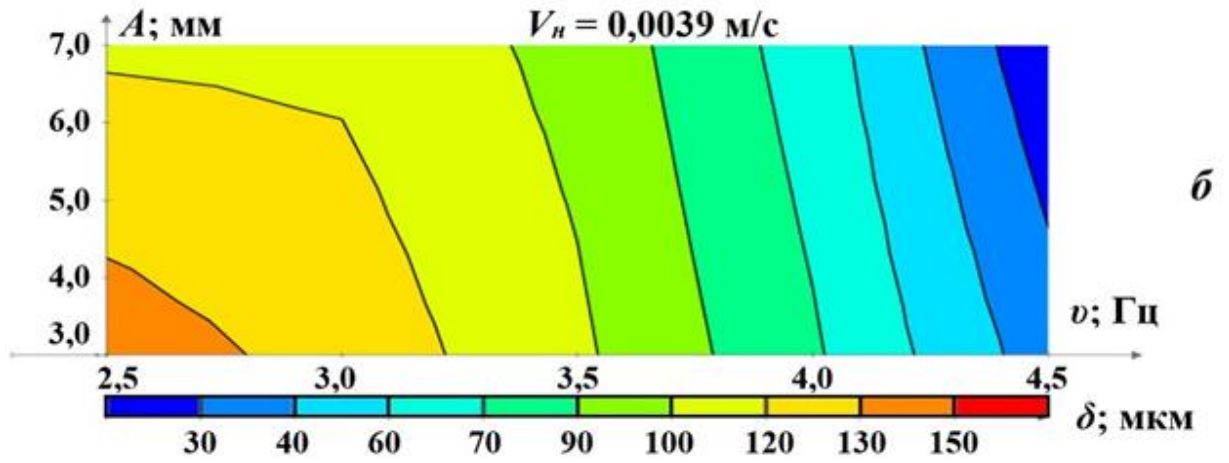


Рисунок Е.1 – Графіки формування розміру кристаліту наплавленого металу δ за зварювальним струмом $I_n = 100,0$ А: а – за $V_n = 0,0028$ м/с, б – за $V_n = 0,0039$ м/с, в – за $V_n = 0,005$ м/с, г – за $V_n = 0,0061$ м/с, д – за $V_n = 0,0072$ м/с





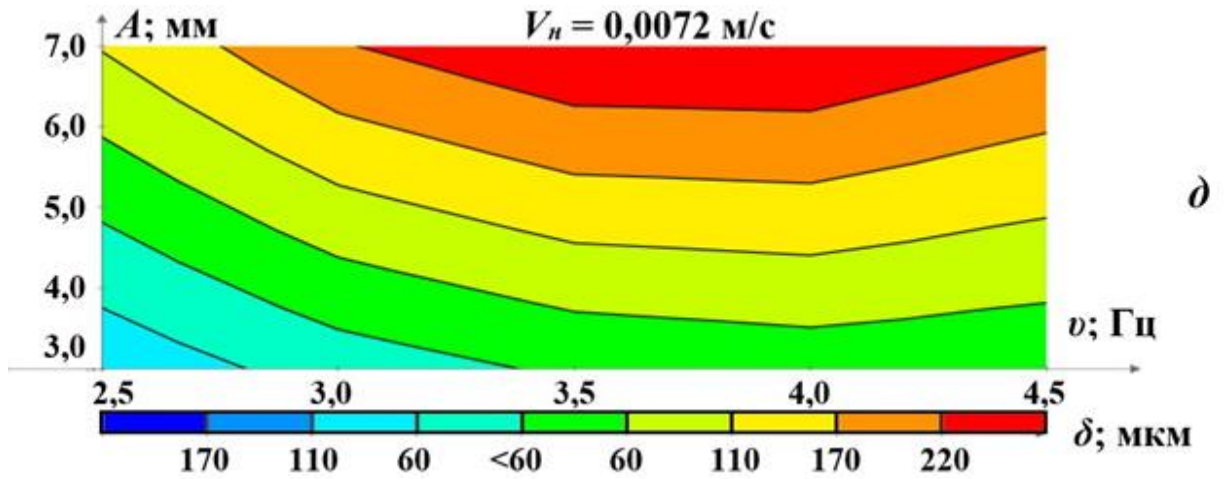
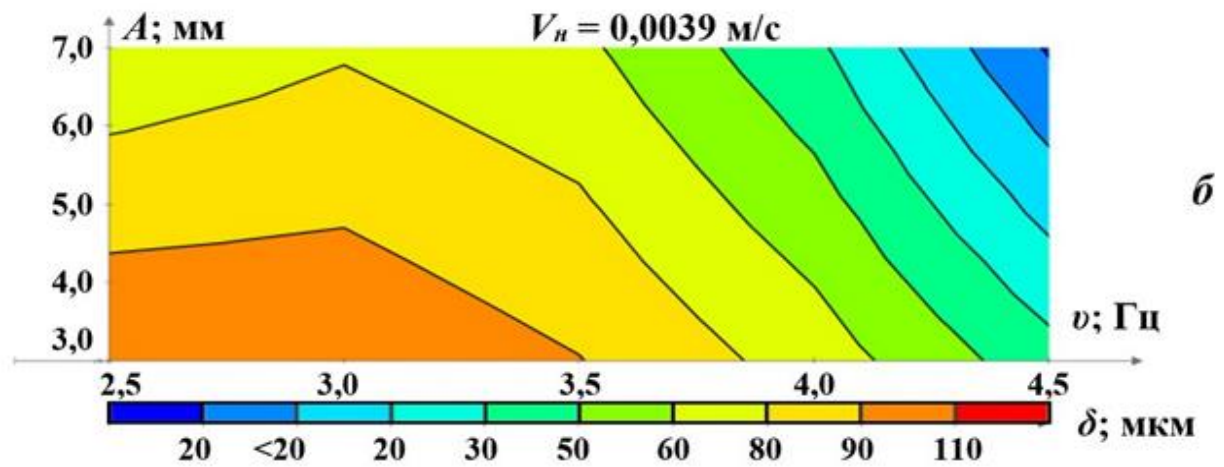
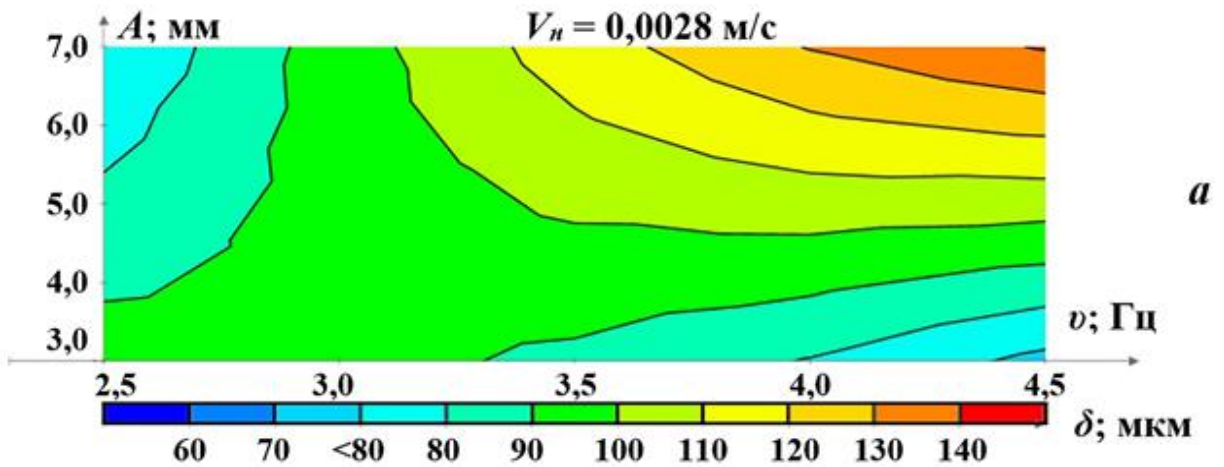


Рисунок Е.2 – Графіки формування розміру кристаліту наплавленого металу δ за зварювальним струмом $I_n = 125,0 \text{ А}$: а – за $V_n = 0,0028 \text{ м/с}$, б – за $V_n = 0,0039 \text{ м/с}$, в – за $V_n = 0,005 \text{ м/с}$, г – за $V_n = 0,0061 \text{ м/с}$, д – за $V_n = 0,0072 \text{ м/с}$



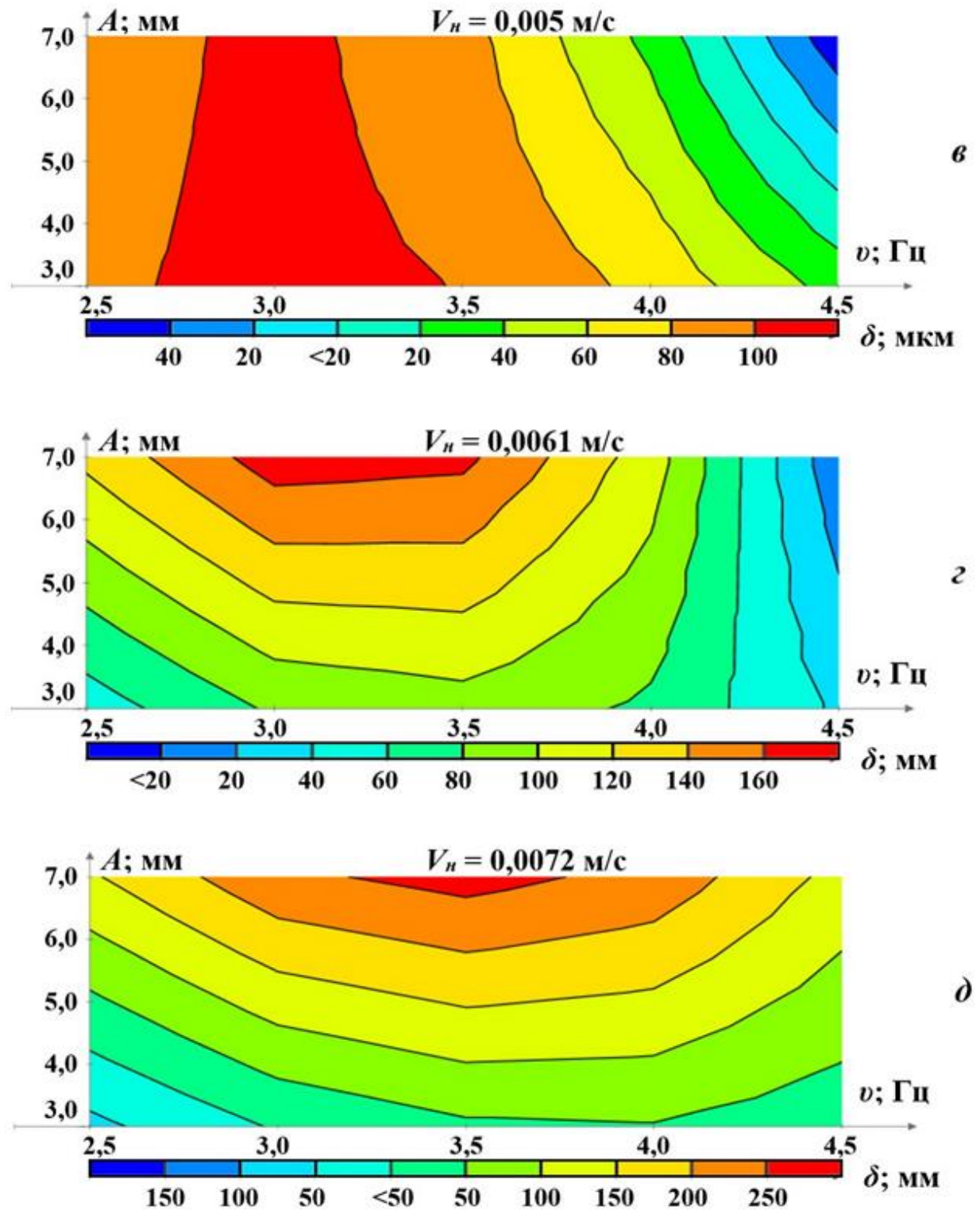
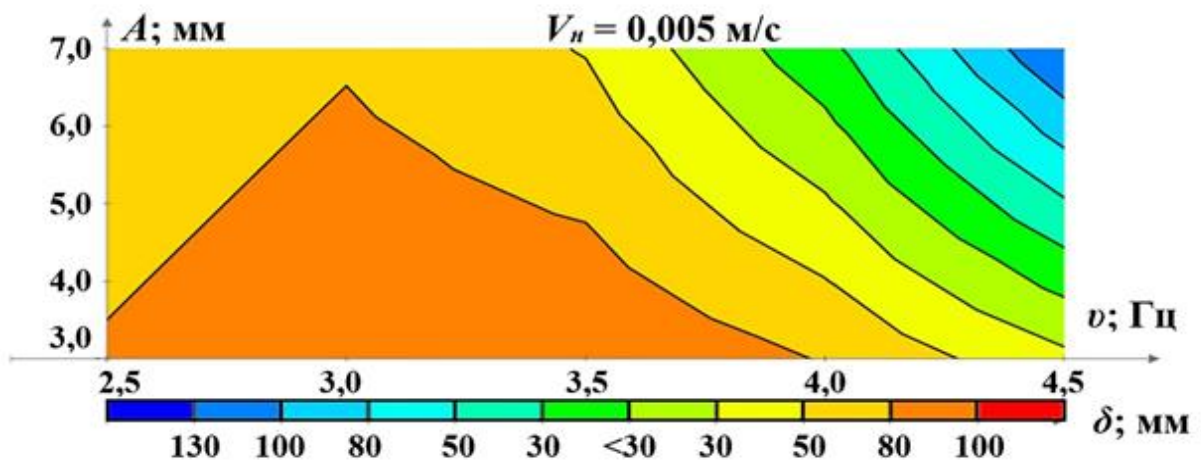
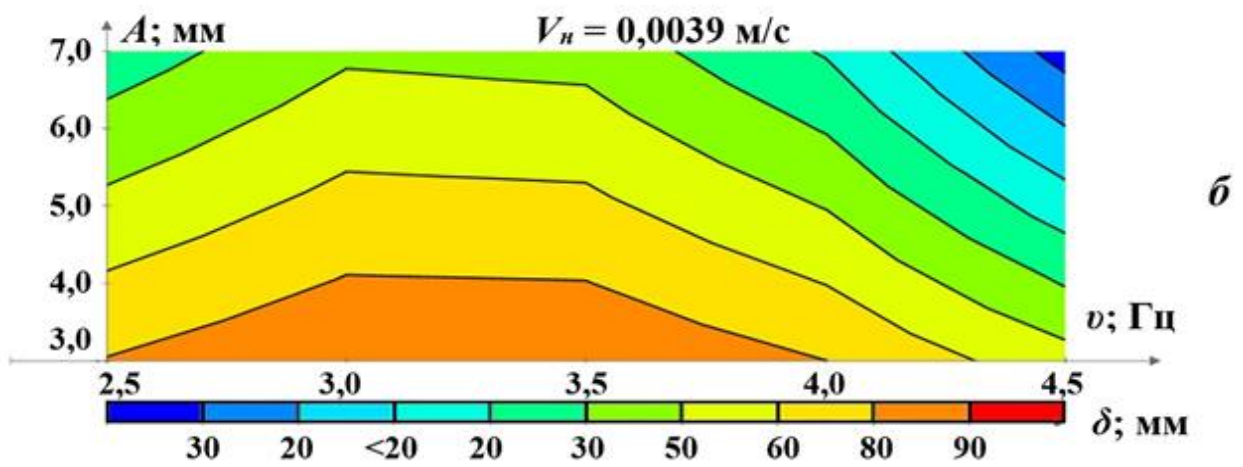
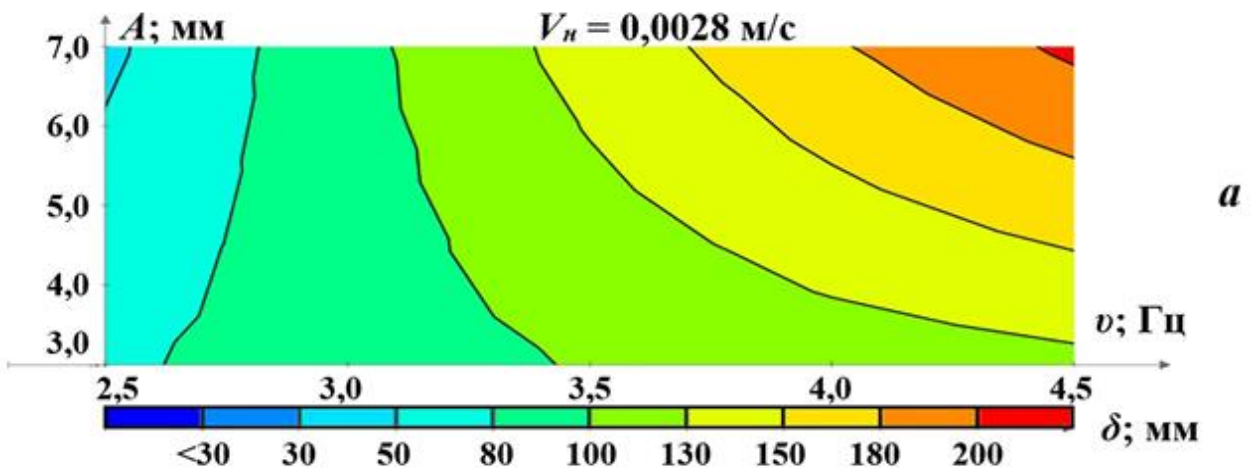


Рисунок Е.3 – Графіки формування розміру кристаліту наплавленого металу δ за зварювальним струмом $I_n = 150,0$ А: а – за $V_n = 0,0028$ м/с, б – за $V_n = 0,0039$ м/с, в – за $V_n = 0,005$ м/с, г – за $V_n = 0,0061$ м/с, д – за $V_n = 0,0072$ м/с



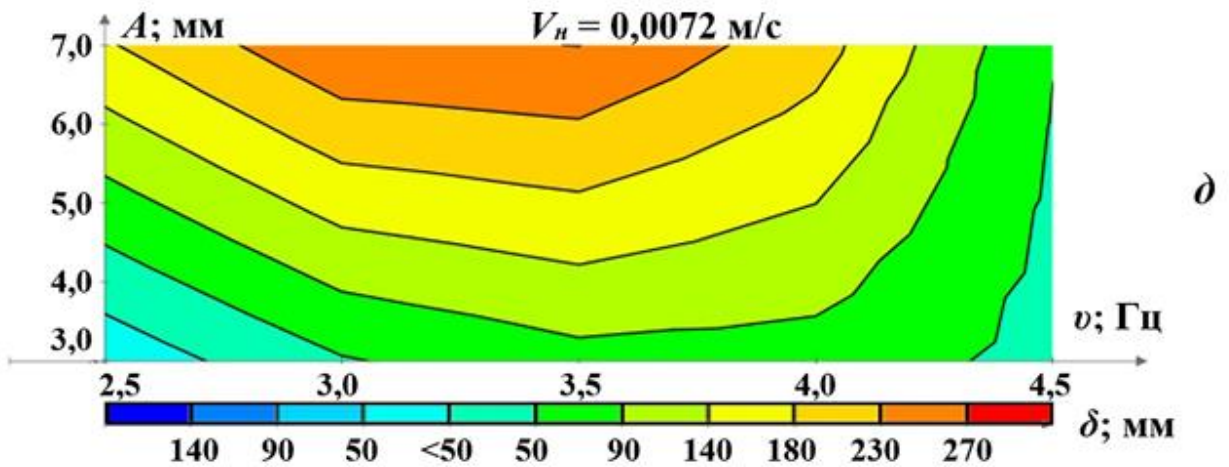
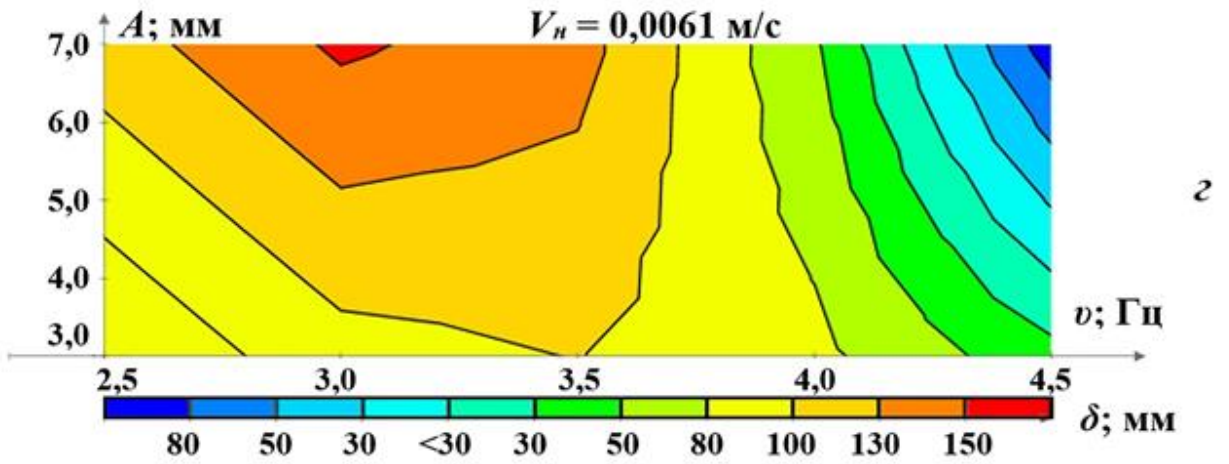
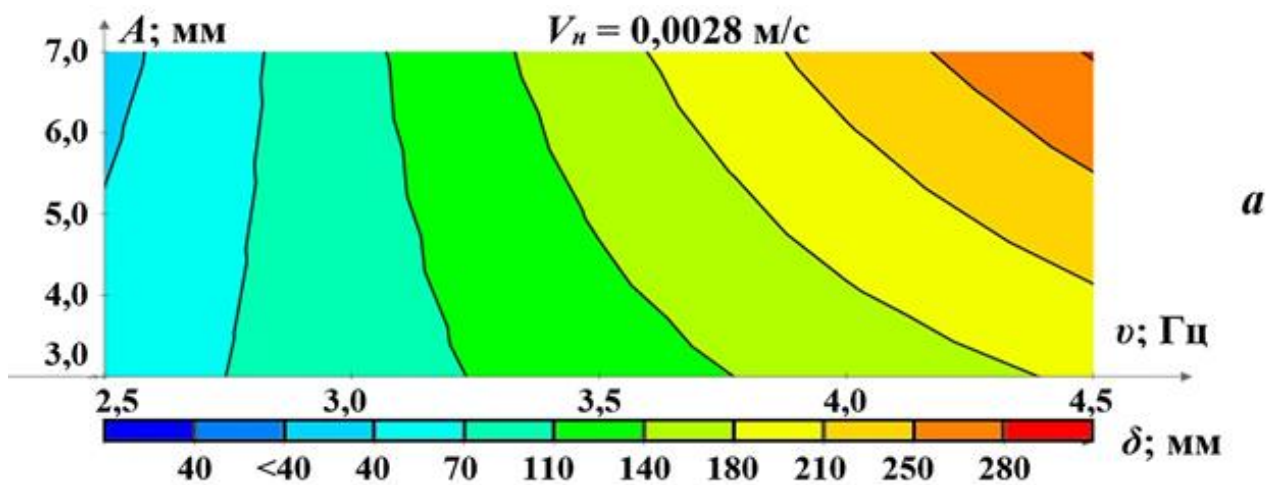
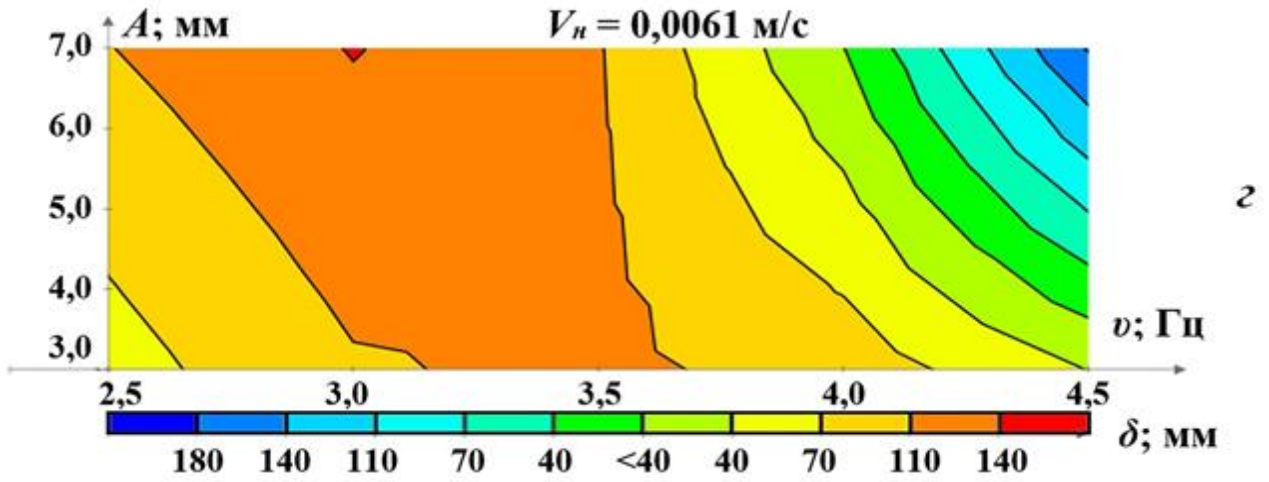
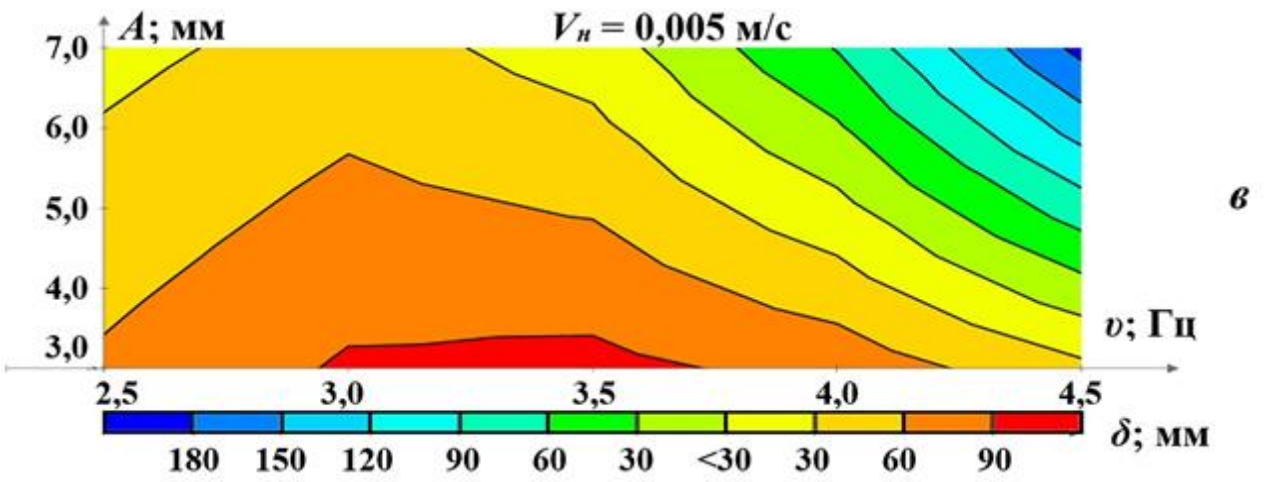
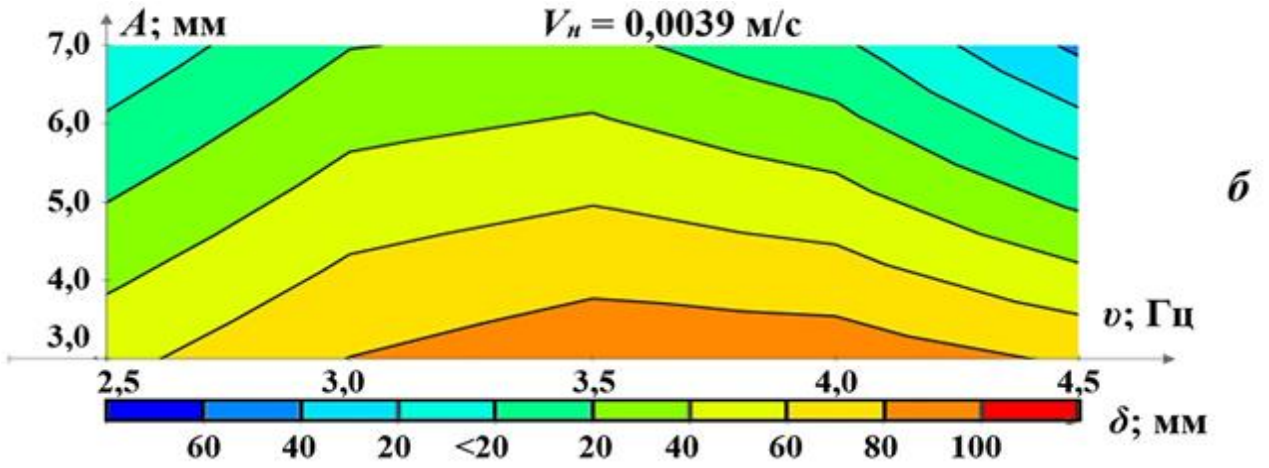


Рисунок Е.4 – Графіки формування розміру кристаліту наплавленого металу δ за зварювальним струмом $I_n = 175,0$ А: а – за $V_n = 0,0028$ м/с, б – за $V_n = 0,0039$ м/с, в – за $V_n = 0,005$ м/с, г – за $V_n = 0,0061$ м/с, д – за $V_n = 0,0072$ м/с





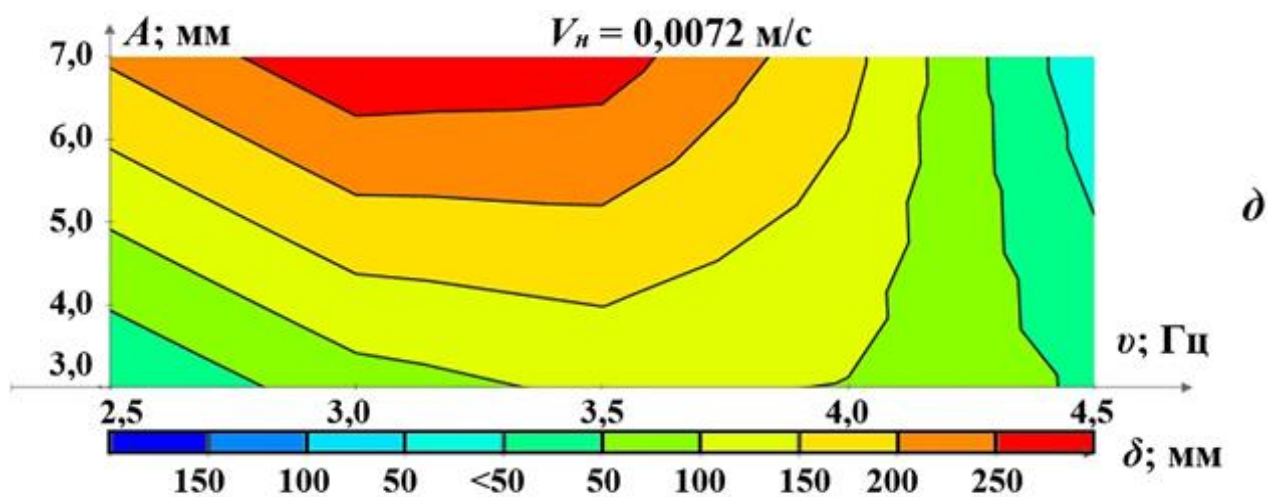


Рисунок Е.5 – Графіки формування розміру кристаліту наплавленого металу δ при зварювальному струмі $I_n = 200,0$ А: а – за $V_n = 0,0028$ м/с, б – за $V_n = 0,0039$ м/с, в – за $V_n = 0,005$ м/с, г – за $V_n = 0,0061$ м/с, д – за $V_n = 0,0072$ м/с

ДОДАТОК Ж

Акт впровадження

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор ВИДАВНИЧИЙ
ДІМ «ФОЛІАНТ»
О.О. Казьмичева
2022 р.



ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор ДП «ДКТБ ІЕЗ
ім. Є.О. Патона НАН України»
Г.В. Жук
2022 р.



АКТ

про використання, розробленої в ДП «ДКТБ ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України», технології дугового наплавлення в вуглекислому газі з використанням механічних низькочастотних гармонійних коливань зварювальної ванни

Ми, що нижче підписалися, представник ВИДАВНИЧИЙ ДІМ «ФОЛІАНТ» головний інженер Омеляничук Л.М. з одного боку та представники ДП «ДКТБ ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України» Лебедев В.О. і ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України Новиков С.В з іншого боку, склали даний акт про те, що для ВИДАВНИЧИЙ ДІМ «ФОЛІАНТ» при відновленні зношених робочих поверхонь плит гідравлічних пресів гарячого тиснення та гідравлічних ударних пресів було застосовано спеціальну технологією дугового наплавлення в вуглекислому газі з використанням низькочастотних гармонійних коливань зварювальної ванни. Наплавлення проводили на експериментальній установці, розробленій в ДП «ДКТБ ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України». Застосування механічних низькочастотних гармонійних коливань зварювальної ванни при напавленні призвело до підвищення твердості наплавленого шару металу та металу зони термічного впливу відновлених робочих поверхонь плит гідравлічних пресів гарячого тиснення і гідравлічних ударних пресів у порівнянні з напавленням без коливань.

Від ВИДАВНИЧИЙ ДІМ
«ФОЛІАНТ»

Головний інженер
Л.М. Омеляничук
Омеляничук Л.М.

Від ДП «ДКТБ» ІЕЗ ім. Є.О. Патона
НАН України д.т.н., професор

В.О. Лебедев
Лебедев В.О.

Від ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України
пров. інж. відділу №13
С.В. Новиков
Новиков С.В.