



KAPITEL 3 / CHAPTER 3

STUDY ON THE INFLUENCE OF PULSED AND CONTINUOUS-WAVE GENERATION MODES OF LASER RADIATION ON THE RESULTS OF WELDING OF CORROSION- AND HEAT-RESISTANT AISI 321 STEEL IN DIFFERENT SPATIAL POSITIONS**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ІМПУЛЬСНОГО ТА НЕПЕРЕРВНОГО РЕЖИМУ ГЕНЕРАЦІЇ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА РЕЗУЛЬТАТИ ЗВАРЮВАННЯ КОРОЗІЙНОСТІЙКОЇ ЖАРОМІЦНОЇ СТАЛІ AISI 321 У РІЗНИХ ПРОСТОРОВИХ ПОЛОЖЕННЯХ**

DOI: 10.30890/2709-2313.2021-07-08-002

Вступ

Номенклатура виробів для приладобудівної, авіакосмічної, вагонобудівної, хімічної та інших галузей промисловості включає деталі як малого так і великого розміру, а їх конструкція часто має складну просторову форму із труднодоступними ділянками для зварювання або із криволінійними профілями поверхні [1-5]. Тому виникає потреба виконання різноманітних видів зварювальних з'єднань (стикових, напусткових, таврових, кутових тощо) у різних положеннях (вертикально, горизонтально, на стелі) або навіть у довільному складному просторовому положенні [6-8]. У таких умовах треба не тільки враховувати, але задіяти на користь фізичні ефекти, які супроводжують лазерне зварювання у таких умовах [9-11]. Наприклад, враховуючи сили гравітації та поверхневого натягу можливо впливати на ступінь розкриття каналу проплавлення при переміщенні зварювальної ванни у різних напрямках. За допомогою сканування, регулювання швидкості руху та імпульсного керування потужністю можливо впливати на тепловкладення у зону обробки. За допомогою керованого подавання газової суміші у зварювальну ванну можливо впливати на стабільність формування каналу проплавлення і ступінь поглинання випромінювання у при поверхневій плазмі. Врахування вищезгаданих особливостей може дозволити отримати сукупність технологічних карт процесу під час зварювання контрольних зразків у різних просторових положеннях. Застосування вищезгаданих технологічних прийомів може дозволити використати вищезгадані особливості для підбору таких параметрів процесу, які забезпечують найкращі показники якості і міцності отриманих зварних з'єднань.

3.1. Методика досліджень

У плоских зразках з нержавіючої аустенітної сталі AISI 321 товщиною 3 мм були зроблені провари, при різних варіантах кута нахилу до горизонтальної площини механізму переміщення лазерної головки та струбцини зі зразком, а саме: у вертикальному положенні під кутом 90°; під кутами 60°; 45°; 30° та у нижньому положенні.

За результатами візуального, радіографічного контролю та



металографічних досліджень одержаних зразків виконана оцінка параметрів, що передбачені стандартом ДСТУ EN ISO 13919-1:2015.

3.2. Аналіз результатів візуального контролю

За результатами візуального контролю одержаних проварів у зразках зі сталі AISI 321, встановлено, що на попередньо обраному режимі зварювання ($P=4,4\text{кВт}$, $V=6000\text{мм/хв}$, $\Delta F=-1\text{мм}$, захисний газ $Ar=30\text{л/хв}$):

- в залежності від напрямку руху («на підйом» чи «на спуск»), спостерігаються значні зміни у впливі захисного газу на процеси, що відбуваються у зварювальній ванні, а саме, при захисті аргоном та зварюванні «на спуск» зафіксовано відсутність кольорів мінливості при формуванні зварного шва, а при зварюванні «на підйом» в захисному середовищі аргону, спостерігається наявність кольорів мінливості на зварному з'єднанні;

- бризки зафіксовані при використанні неперервного та імпульсного режиму в усіх просторових положеннях, їхня кількість мінімальна при нижньому положенні, дещо зростає при куті нахилу 60° та вертикальному положенні та найвища кількість бризок зафіксовано при лазерному зварюванні на кутах нахилу 30° та 45° ;

- при зварюванні «на підйом» у неперервному режимі генерації лазерного випромінювання при всіх кутах нахилу, верхній валік зварного з'єднання формується з незначним утонінням та з формуванням «гребінця», величина «гребінця» та утоніння збільшується зі збільшенням кута нахилу до горизонтальної площини;

- при зварюванні «на спуск» у неперервному режимі генерації лазерного випромінювання, встановлено, що верхній валік зварного з'єднання формується з незначним утонінням та з формуванням «гребінця», лише при куті нахилу 30° .

3.3. Аналіз результатів радіографічного контролю

За результатами радіографічного контролю одержаних проварів у зразках зі сталі AISI 321, встановлено, що при зварюванні «на підйом» та «на спуск» у неперервному режимі генерації лазерного випромінювання (на попередньо обраному режимі $P=4,4\text{кВт}$, $V=6000\text{мм/хв}$, $\Delta F=-1\text{мм}$, захисний газ $Ar=30\text{л/хв}$), при всіх кутах нахилу ($30-90^\circ$) та у нижньому положенні, не було виявлено внутрішніх дефектів у вигляді тріщин, пор, включень і непроварів.

За результатами радіографічного контролю одержаних проварів у зразках зі сталі AISI 321, встановлено, що при зварюванні «на підйом» та «на спуск» у імпульсному режимі генерації лазерного випромінювання (на попередньо обраному режимі $P=4,4\text{кВт}$, імпульс $60/40$, 120Гц , $V=6000\text{мм/хв}$, $\Delta F=-1\text{мм}$, захисний газ $Ar=20\text{л/хв}$), при всіх кутах нахилу ($30-90^\circ$) та у нижньому положенні, було виявлено наступні внутрішні дефекти у вигляді одиночних пор або ланцюжків пор:

1. при зварюванні «на спуск» при куті нахилу 30° , виявлено ланцюжки пор



по всій довжині шва, з максимальним розміром пори $\varnothing 0,4$ мм;

2. при зварюванні «на спуск» при куті нахилу 45° , виявлено одиночну пору розміром $\varnothing 0,3$ мм;

3. при зварюванні «на спуск» при куті нахилу 60° , виявлено одиночні пори по всій довжині шва, з максимальним розміром пори $\varnothing 0,5$ мм;

4. при зварюванні «на спуск» при куті нахилу 90° , виявлено 2 ланцюжки пор сумарною довжиною по 25 мм, з максимальним розміром пори $\varnothing 0,5$ мм;

5. при зварюванні «на підйом» при куті нахилу 30° , виявлено ланцюжки пор по всій довжині шва, з максимальним розміром пори $\varnothing 0,3$ мм;

6. при зварюванні «на підйом» при куті нахилу 45° , внутрішніх дефектів у вигляді тріщин, пор, включень і непроварів не виявлено;

7. при зварюванні «на підйом» при куті нахилу 60° , виявлено 2 ланцюжки пор сумарною довжиною по 8 мм, з максимальним розміром пори $\varnothing 0,3$ мм;

8. при зварюванні «на підйом» при куті нахилу 90° , виявлено 3 одиночні пори, з максимальним розміром пори $\varnothing 0,3$ мм;

9. при зварюванні у нижньому положенні, виявлено ланцюжки пор по всій довжині шва, з максимальним розміром пори $\varnothing 0,5$ мм.

Аналіз рентгенограм (Таблиця 1) показує тенденцію збільшення як кількості так й розміру пор у зразках зі сталі AISI 321, при зменшенні кута нахилу з 90° до 0° при зварюванні «на спуск» та «на підйом» в імпульсному режимі генерації лазерного випромінювання. Треба відзначити екстремальне мале значення сумарної проекції пор при зварюванні під кутами 45° та 90° . У той же час, варто відзначити, що кількість та розмір одиночних пор (чи протяжність ланцюжків пор) менша при зварюванні «на підйом», у порівнянні з режимом зварювання «на спуск» при одному й тому ж куті при імпульсному режимі генерації лазерного випромінювання.

Таблиця 1 – Зміни сумарної площі проекцій пор, в залежності від зміни режимів параметрів режимів лазерного зварювання зразків зі сталі AISI 321 товщиною 3 мм, одержаних у різних просторових положеннях

Кут нахилу, $^\circ$	Сумарна проекція пор, %		
	вгору неперервний режим	вгору імпульсний режим	вниз імпульсний режим
0	0	0,042	0,042
30	0	0,05	0,07
45	0	0,016	0,01
60	0	0,13	0,17
90	0	0,002	0,013

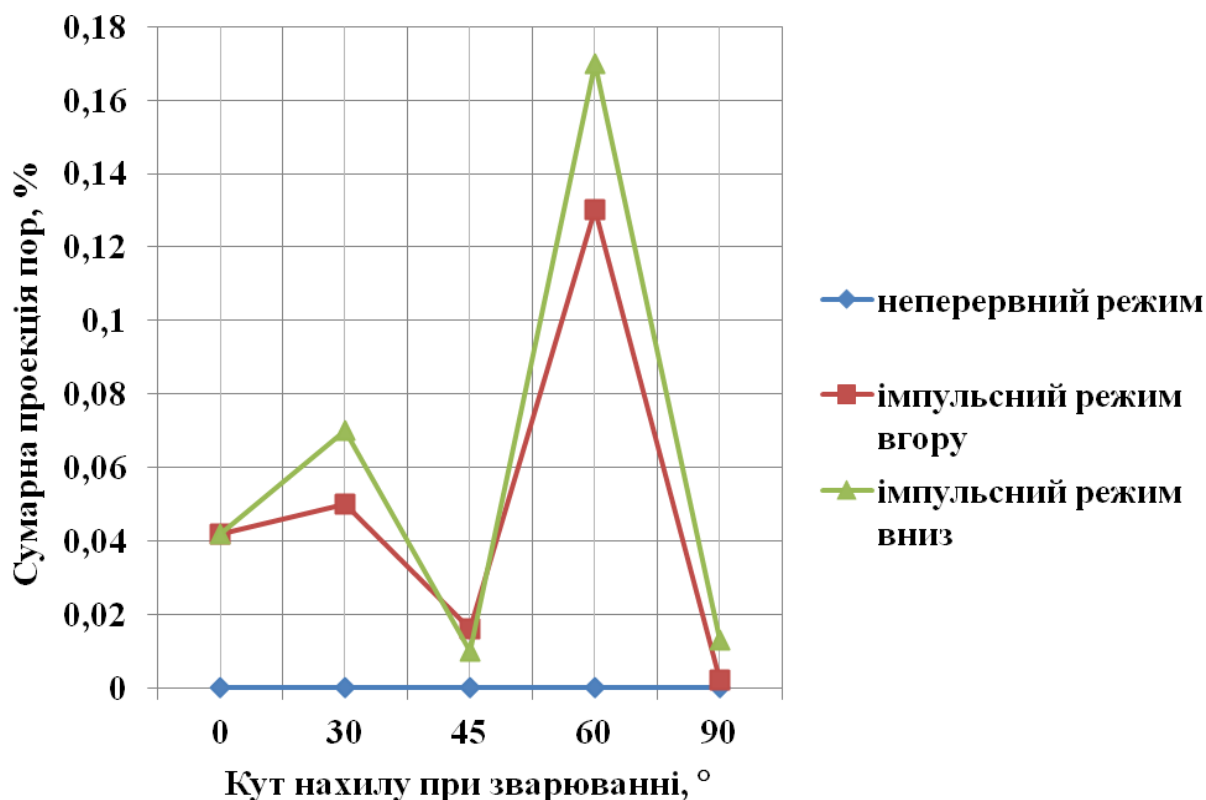


Рис. 1. Графічні залежності зміни сумарної площі проекцій пор, в залежності від зміни режимів параметрів режимів лазерного зварювання зразків зі сталі AISI 321 товщиною 3 мм, одержаних у різних просторових положеннях

3.4. Аналіз результатів металографічних досліджень

Металографічні дослідження зварних зразків виконувалися відповідно до стандарту ISO 17639: 2003 "Випробування з руйнуванням зразка зварних швів в металевих матеріалах. Макро- і мікроскопічне дослідження зварних швів».

Випробувальні зразки готували для оцінки за допомогою фрезерування, шліфування, полірування і травлення, згідно ISO 16060:2003.

За допомогою оптичної мікроскопії (використовували мікроскоп «Neophot-32») і мікродюрOMETРИЧНОГО аналізу, досліджували зразки, які відрізнялися параметрами технологічних режимів.

За допомогою оптичної мікроскопії досліджені зразки, які відрізняються параметрами технологічних режимів. Дослідження проведені на різних ділянках кожного із зразків «зварений шов → зона термічного впливу (ЗТВ) → основний метал». Випробувальні зразки для металографічних досліджень готували, згідно ISO 16060:2003, за допомогою фрезерування, шліфування, полірування на високошвидкісних полірувальних колах з використанням алмазних паст різної дисперсності. Виявлення структури зварних з'єднань проводили шляхом електролітичного травлення в 20% водному розчині хромової кислоти. Дослідження мікроструктури проводилося на металографічному мікроскопі «Neophot-32» при різних збільшеннях. Кількість



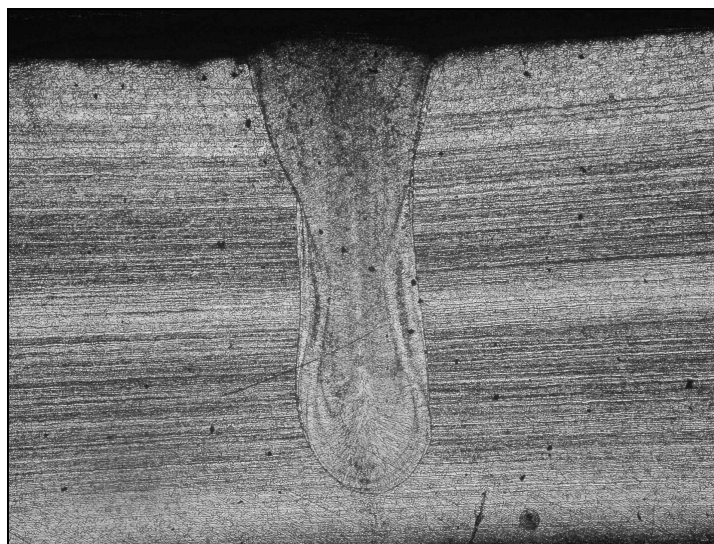
α -фази вимірювали на приладі «Ferritgehaltmessr 1.053». Твердість фазових складових вимірювали на мікротвердомірі «М-400» фірми «LECO». Навантаження становило 1 Н, час витримки 10 с. Розмір аустенітного зерна визначали шляхом порівняння з еталонними шкалами ГОСТ 5639-82. Зображення мікроструктур було отримано за допомогою цифрової фотокамери «Olympus».

На Рис. 2 наведено загальний вид, фотографії структури металу у центрі шва та у лінії сплавлення зварного з'єднання №1366.1, звареного у нижньому просторовому положенні. Структура металу шва зварного з'єднання №1366.1 дисперсна, лита.

На Рис. 2 видно дві зони: в центральній частині шва по всій висоті комірчасто-дендритна структура, в середній частині шва ближче до лінії сплавлення спостерігається зона тонких стовпчастих кристалітів, що ростуть в напрямку відводу тепла. Зони розділені лінією більш дрібних кристалітів. Мікроструктура в центральній частині шва являє собою аустенітну матрицю і невелику кількість δ -фериту (1,5-1,7%). Розмір комірок становить, в основному, 12-13 мкм. Твердість металу шва зварного з'єднання №1366.1 у центральній частині складає HV1 2950-3090 МПа, є ділянки, де твердість підвищується до HV1 3200-3380 МПа. В нижній частині шва твердість підвищується до HV1 3320-3650 МПа. У лінії сплавлення зварного з'єднання №1366.1, мікроструктура також складається з аустеніту і δ -фериту, структура дрібніша ніж в центрі шва. Ширина кристалітів становить 2-9 мкм. Твердість металу у лінії сплавлення зварного з'єднання №1366.1 складає HV1 2990-3030 МПа, є окремі ділянки, де твердість підвищується до HV1 3160 МПа. У металі шва спостерігаються нітриди (в незначній кількості) і поодинокі шлакові включення. Зона термічного впливу не виражена, структура складається з аустеніту, бал зерна в ЗТВ зварного з'єднання №1366.1 – №6. Твердість ЗТВ зварного з'єднання №1366.1 становить HV1 2650-2840 МПа.

Як показали данні металографічних досліджень, у структурі зварних з'єднань, одержаних у різних просторових положеннях у сталі AISI 321 товщиною 3 мм, суттєвих змін не відбувається. При різних значеннях кута нахилу площини у якій виконується зварювання, до горизонтальної площини, значення мікротвердості у відповідних зонах, розміри кристалітів, бал зерна у ЗТВ зварного з'єднання не зазнають значних змін. Натомість геометрія одержаних проварів змінюється досить суттєво.

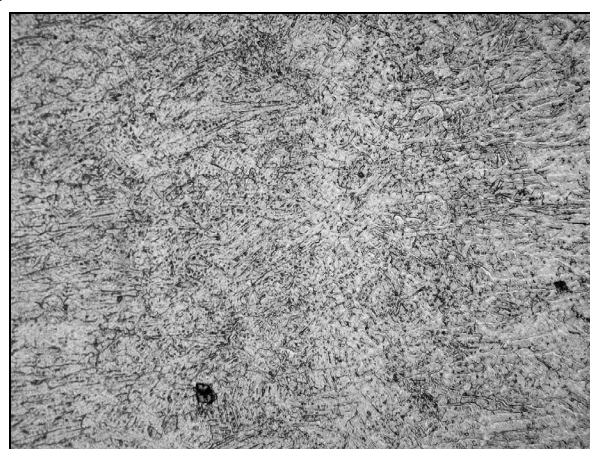
За результатами дослідження зміни геометричних параметрів проварів у сталі AISI 321 товщиною 3 мм, одержаних лазерним зварюванням у різних просторових положеннях, виконаний аналіз результатів дослідження геометрії, структури та характеристик якості зварних з'єднань на відповідність міжнародним стандартам (зокрема ДСТУ EN ISO 13919-1:2015). Одержані дані представлені у Таблицях 2-7. Побудовані графічні залежності (Рис. 3 – Рис. 8), які дозволяють виявити закономірності, характер та ступень впливу складових процесу на поведінку зварювальної ванни при лазерному зварюванні в різних просторових положеннях.



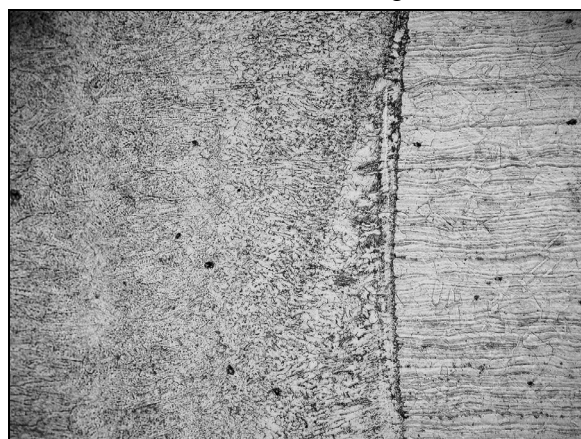
а



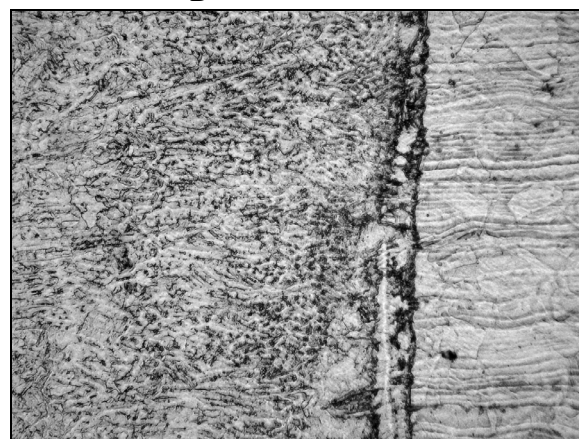
б



в



г



д

Рис. 2. Структура металу у зварному з'єднанні в зразку №1366.1, звареного у нижньому просторовому положенні: а - загальний вигляд $\times 30$; б - центр шва $\times 200$; в- центр шва $\times 400$; г - у лінії сплавлення $\times 200$; д - у лінії сплавлення $\times 400$

При виготовленні контрольних стикових з'єднань товщиною 3,0 мм зі сталі AISI 321, встановлено, що залежність зміни площі провару при збільшенні кута нахилу з 0° до 90° , має нелінійних характер, як при зварюванні на спуск так й при зварюванні вгору, незалежно від режиму генерації лазерного



випромінювання (Рис. 3). Зафіксовано наявність екстремуму, який на всіх варіантах режимів (окрім імпульсного зварювання вгору) проявляється при куті нахилу 45°. Дане явище можна пояснити як зміною параметрів течій у ванні розплаву так й зміною ступеню впливу газового захисту ванни розплаву. Однак для формулювання остаточних висновків, це явище потребує додаткового всебічного вивчення.

Таблиця 2 – Зміна площі поперечного перерізу зварних з’єднань з нержавіючої сталі AISI 321 товщиною 3 мм, одержаних лазерним зварюванням у різних просторових положеннях

Кут нахилу, °	Площа провару, мм ²			
	вгору неперервний режим	вниз неперервний режим	вгору імпульсний режим	вниз імпульсний режим
0	2,317	2,317	0,92	0,92
30	2,505	2,491	1,111	1,315
45	3,034	9,43	1,59	2,356
60	2,6	2,64	2,27	1,31
90	2,584	2,1	1,053	0,72

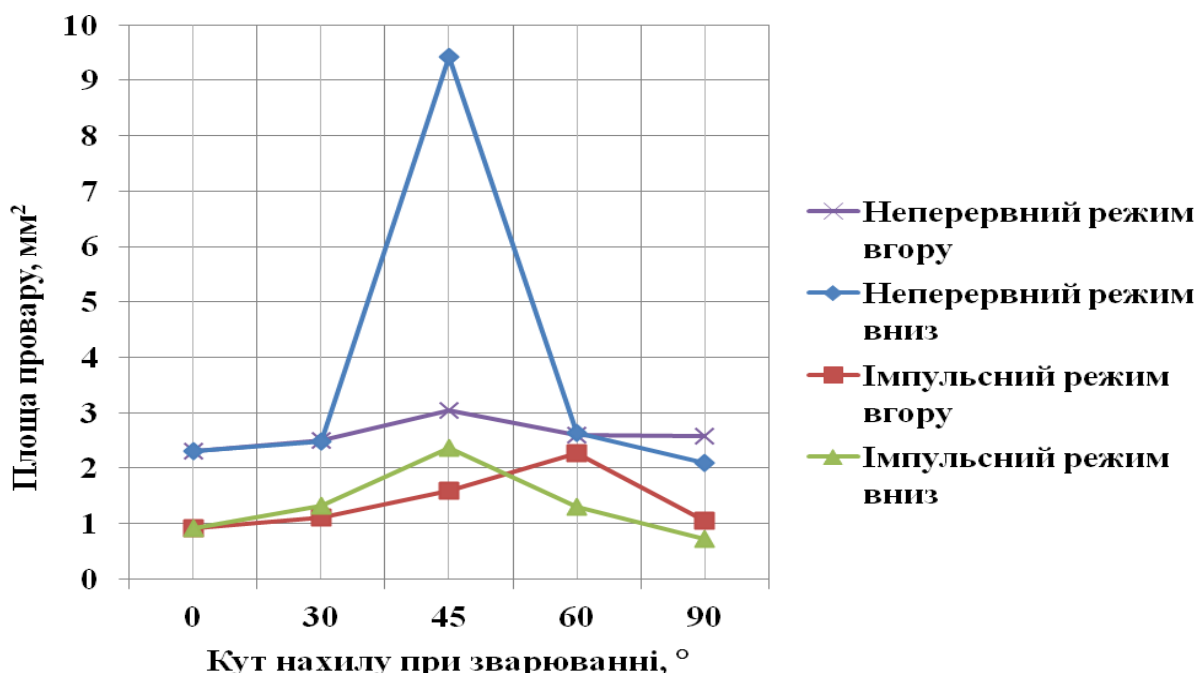


Рис. 3. Залежність зміни площі поперечного перерізу зварних з’єднань з нержавіючої сталі AISI 321 товщиною 3 мм, одержаних лазерним зварюванням у різних просторових положеннях

Як, видно, з даних Таблиці 2 та Рис. 3, при зварюванні на спуск у неперервному режимі при куті нахилу 45°, площа зварного з’єднання збільшилася у більш ніж 3 рази, порівняно зі зварюванням на цьому ж режимі



вгору. Вочевидь, це відбувається за рахунок більш тривалого перебування металу зварного з'єднання при температурах вищих за температуру плавлення, що призводить до збільшення об'єму ванни розплавленого металу, та як результат, - й площі зварного з'єднання.

Встановлено, що при зміні режиму генерації лазерного випромінювання з неперервного на імпульсний при куті нахилу зварювання 45° , зберігається та ж сама тенденція збільшення площі провару. Однак різниця у даних носить не такий екстремальний характер.

Треба відзначити, що для залежностей зміни площі поперечного перерізу зварних з'єднань з нержавіючої сталі AISI 321 товщиною 3 мм, одержаних лазерним зварюванням у різних просторових положеннях (Рис. 3), було характерним те, що при зміні кута нахилу при лазерному зварюванні на неперервному режимі вгору різниця екстремальних значень характерних максимумів та мінімумів вказаних залежностей не перевищує 24%, тобто відрізняється не більше ніж у 1,25 раз. У той час, коли при зварюванні на спуск у неперервному режимі генерації лазерного випромінювання, характерні значення екстремумів відповідних залежностей відрізняються майже у 4,5 рази (Рис. 3). При цьому значення площі поперечного перерізу зварних з'єднань у екстремальних точках (при куті нахилу 45°), одержані при зварюванні на спуск та в гору при неперервному режимі генерації лазерного випромінювання, відрізняються більше ніж у 3 рази.

Варто відзначити, що при зварюванні у різних просторових положеннях з використанням імпульсного режиму генерації лазерного випромінювання, вказані дані значно відрізняються (Рис. 3). Так, при імпульсному зварюванні вгору, різниця екстремальних значень характерних максимумів та мінімумів вказаних залежностей не перевищує 60%, тобто вони між собою відрізняються не більше ніж у 2,5 рази. А при імпульсному зварюванні на спуск, характерні значення екстремумів відповідних залежностей відрізняються майже у 3,3 рази (Рис. 3). При цьому значення площі поперечного перерізу зварних з'єднань у екстремальних точках, одержані при зварюванні на спуск та в гору при імпульсному режимі генерації лазерного випромінювання (при куті нахилу 45° для зварювання на спуск та 60° при зварюванні вгору), відрізняються менше ніж на 5%.

У Таблиці 3 та на Рис. 4 показана зміна висоти шва у зварних з'єднаннях з нержавіючої сталі AISI 321 товщиною 3 мм, одержаних лазерним зварюванням у різних просторових положеннях. Як й для зміни площі провару, характер залежностей нелінійний та має екстремальні значення. Але різниця у даних, одержаних для зварювання угору та на спуск, для переважної більшості контрольних точок не перевищує 15 %, при одному й тому ж режимі генерації лазерного випромінювання.

Цікавим є той факт, що екстремально високі значення зафіксовані при зварюванні з кутом нахилу 45° у імпульсному режимі на спуск та неперервному режимі вгору (Рис. 4). У той час, коли при зварюванні у неперервному режимі на спуск та імпульсному режимі вгору, екстремум значень одержаний при куті



Таблиця 3 – Зміна висоти шва у зварних з’єднаннях з нержавіючої сталі AISI 321 товщиною 3 мм, одержаних лазерним зварюванням у різних просторових положеннях

Кут нахилу, °	Висота шва, мм			
	вгору неперервний режим	вниз неперервний режим	вгору імпульсний режим	вниз імпульсний режим
0	2,685	2,685	1,49	1,49
30	2,6	2,59	1,49	1,73
45	3,367	3,05	1,92	2,31
60	2,98	3,15	2,74	1,85
90	2,62	2,29	1,55	1,19

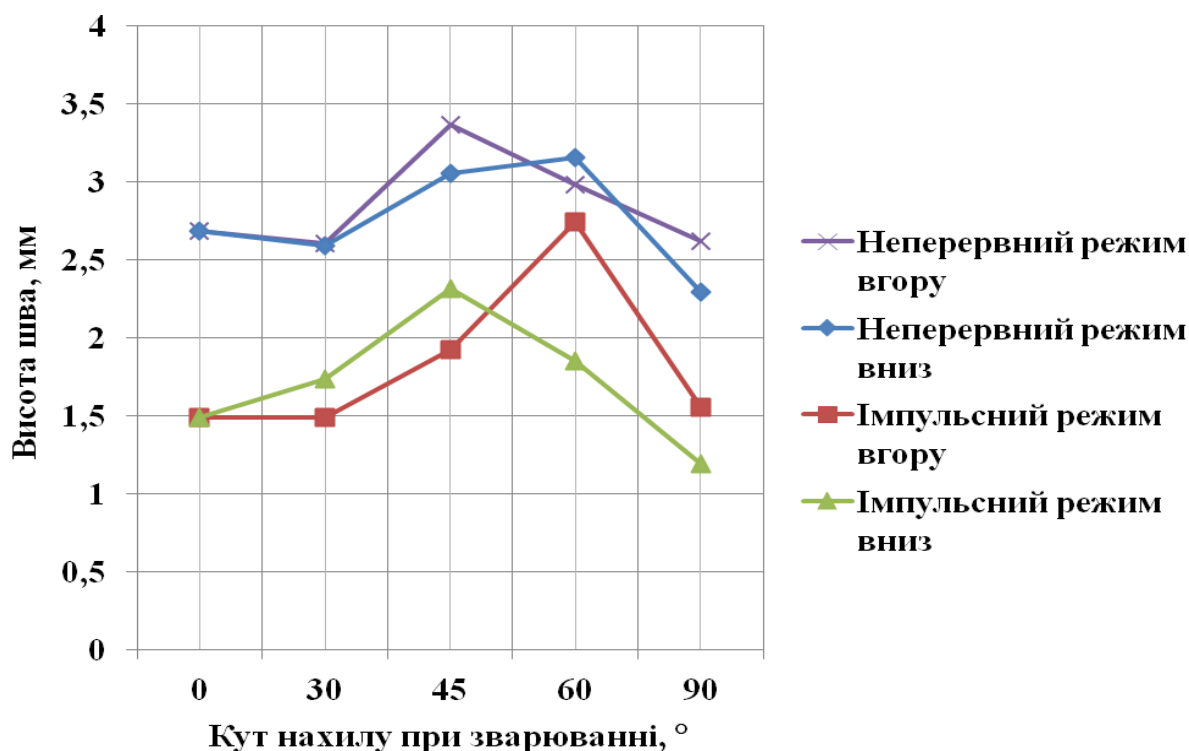


Рис. 4. Залежність зміни висоти шва у зварних з’єднаннях з нержавіючої сталі AISI 321 товщиною 3 мм, одержаних лазерним зварюванням у різних просторових положеннях

нахилу 60°. Значення, які перевищують товщину 3,0 мм пластин що зварювались, пояснюються утворенням верхнього та нижнього валіка зварного з’єднання. Варто відзначити, що зміна значення висоти шва у зварних з’єднаннях з нержавіючої сталі AISI 321 товщиною 3 мм, при зміні кута нахилу при лазерному зварюванні на неперервному режимі вгору не перевищує 22%. У той час, коли при зварюванні на спуск у неперервному режимі генерації лазерного випромінювання це значення складає 27%, а при зміні режиму генерації на імпульсний наближається до 100%.

Залежність зміни глибини провару у зварних з’єднаннях з нержавіючої



сталі AISI 321 товщиною 3 мм, одержаних лазерним зварюванням у різних просторових положеннях наведена на Рис. 5 за даними Таблиці 4. Порівняння характеру графічних залежностей на Рис. 4 та Рис. 5, показує їх велику схожість та дозволяє робити тотожні (вищенаведеним) висновки для характеру зміни глибини провару в залежності від зміни кута нахилу при зварюванні.

Таблиця 4 – Зміна глибини провару у зварних з’єднаннях з нержавіючої сталі AISI 321 товщиною 3 мм, одержаних лазерним зварюванням у різних просторових положеннях

Кут нахилу, °	Глибина провару, мм			
	вгору неперервний режим	вниз неперервний режим	вгору імпульсний режим	вниз імпульсний режим
0	2,685	2,685	1,49	1,49
30	2,6	2,59	1,49	1,73
45	3,367	3,05	1,92	2,31
60	2,98	3,15	2,74	1,85
90	2,62	2,29	1,55	1,19

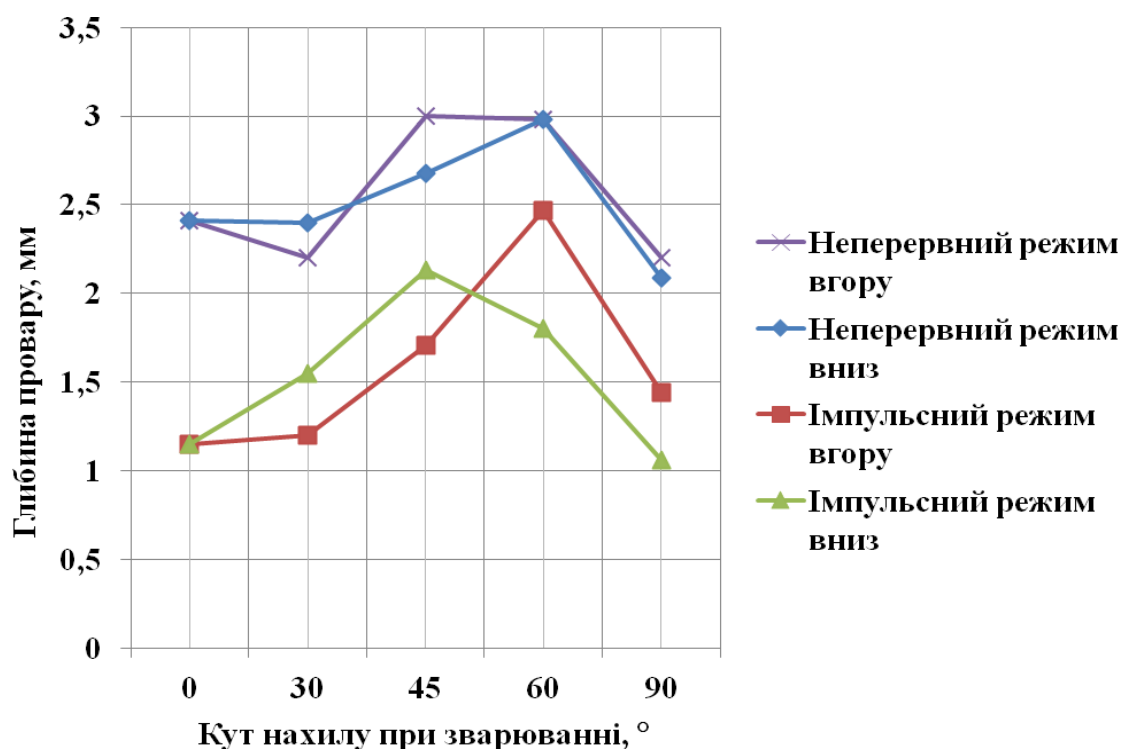


Рис. 5. Залежність зміни глибини провару у зварних з’єднаннях з нержавіючої сталі AISI 321 товщиною 3 мм, одержаних лазерним зварюванням у різних просторових положеннях

Згідно ДСТУ EN ISO 13919-1:2015, перевищення випуклості провару зварних з’єднань з нержавіючої сталі AISI 321 товщиною 3 мм, одержаних лазерним зварюванням у різних просторових положеннях, для одержання



найвищого рівня якості «В» не повинно перевищувати значення 0,65 мм. Аналіз даних наведених у Таблиці 5 та залежностей наведених на Рис. 6, дозволяють стверджувати про досягнення необхідних значень. У той же час, як видно з Рис. 6, при зварюванні на деяких режимах зафіксовані від’ємні значення, які свідчать про наявність заниження шва, яке, згідно ДСТУ EN ISO 13919-1:2015, для зварних з’єднань з нержавіючої сталі AISI 321 товщиною 3 мм, одержаних лазерним зварюванням, не повинно перевищувати 0,3 мм.

Таблиця 5 – Зміни перевищення випуклості провару зварних з’єднань з нержавіючої сталі AISI 321 товщиною 3 мм, одержаних лазерним зварюванням у різних просторових положеннях

Кут нахилу, °	Перевищення випуклості провару, мм			
	вгору неперервний режим	вниз неперервний режим	вгору імпульсний режим	вниз імпульсний режим
0	0,275	0,275	0,347	0,347
30	0,4	0,19	0,29	0,18
45	0,183	-0,16	0,21	0,18
60	-0,09	0,15	-0,18	0,05
90	0,42	0,2	0,11	0,13

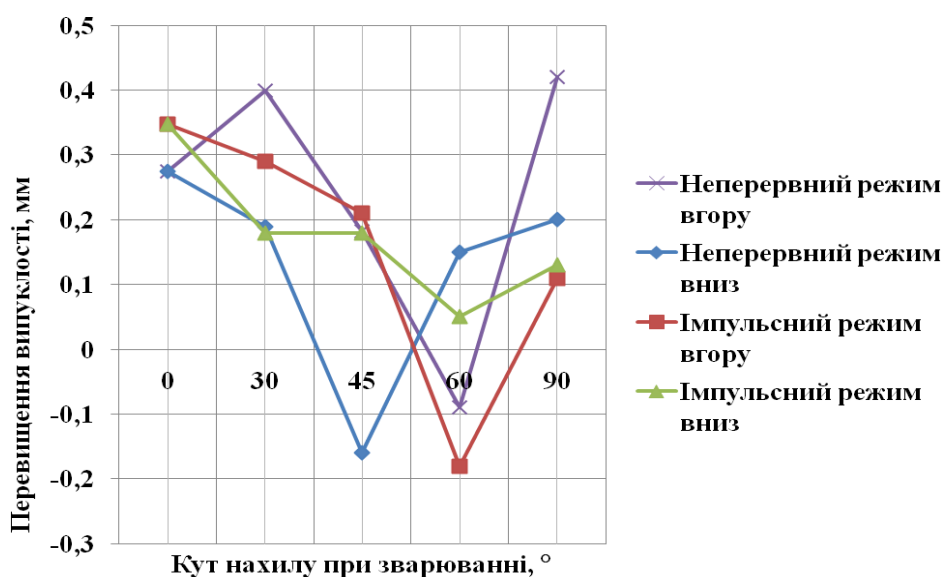


Рис. 6. Залежність зміни перевищення випуклості провару зварних з’єднань з нержавіючої сталі AISI 321 товщиною 3 мм, одержаних лазерним зварюванням у різних просторових положеннях

Залежність зміни ширини шва у зварних з’єднаннях з нержавіючої сталі AISI 321 товщиною 3 мм, одержаних лазерним зварюванням у різних просторових положеннях наведена на Рис. 7 за даними Таблиці 6.



Таблиця 6 – Зміни ширини шва у зварних з’єднаннях з нержавіючої сталі AISI 321 товщиною 3 мм, одержаних лазерним зварюванням у різних просторових положеннях

Кут нахилу, °	Ширина провару, мм			
	вгору неперервний режим	вниз неперервний режим	вгору імпульсний режим	вниз імпульсний режим
0	1,29	1,29	0,93	0,93
30	1,56	1,42	1,18	1,25
45	1,32	3,83	1,25	1,66
60	1,4	1,26	1,37	1,15
90	1,66	1,58	0,87	1,09

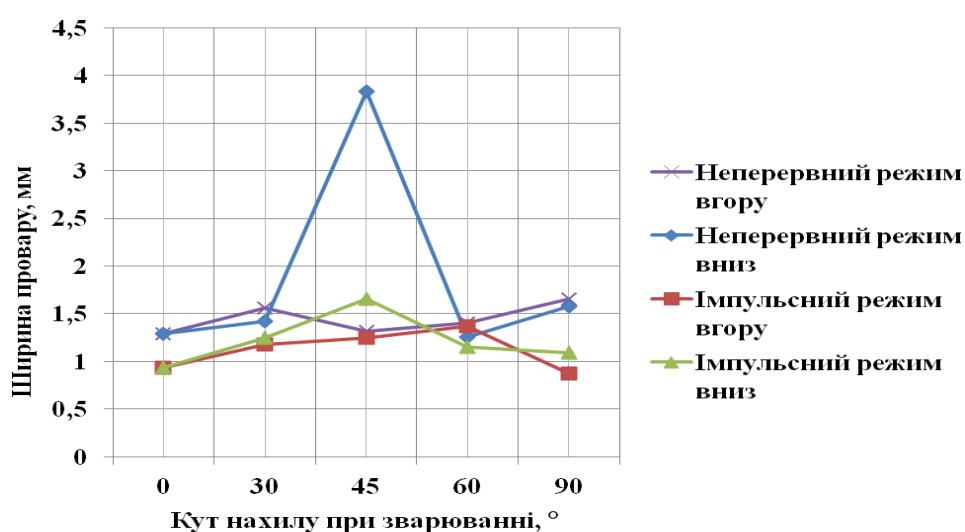


Рис. 7. Залежність зміни ширини шва у зварних з’єднаннях з нержавіючої сталі AISI 321 товщиною 3 мм, одержаних лазерним зварюванням у різних просторових положеннях

Порівняння характеру графічних залежностей на Рис. 3 та Рис. 7, показує їх велику схожість та дозволяє робити тотожні (вищенаведеним) висновки для характеру зміни ширини шва в залежності від зміни кута нахилу при зварюванні. Дійсно, для залежностей зміни ширини шва у зварних з’єднаннях з нержавіючої сталі AISI 321 товщиною 3 мм, одержаних лазерним зварюванням у різних просторових положеннях (Рис. 7), характерна та ж сама картина зміни значень контрольних точок. Однак відносна різниця між абсолютними значеннями ширини шва (Таблиця 6) відрізняється від відносної різниці між абсолютними значеннями зміни площі поперечного перерізу зварних з’єднань (Таблиця 2). Так, наприклад, при зміні кута нахилу при лазерному зварюванні на неперервному режимі вгору різниця екстремальних значень характерних максимумів та мінімумів між абсолютними значеннями ширини шва, одержаних під різними кутами зварювання не перевищує 22%, тобто відрізняється не більше ніж у 1,25 раз. У той час, коли при зварюванні на спуск



у неперервному режимі генерації лазерного випромінювання, характерні значення екстремумів відповідних залежностей відрізняються більш ніж у 3 рази (Таблиця 6 та Рис. 7). При цьому значення ширини шва у екстремальних точках, одержані при зварюванні на спуск та в гору при неперервному режимі генерації лазерного випромінювання, відрізняються майже у 3 рази.

Варто відзначити, що як для даних щодо зміни площі поперечного перерізу зварних з'єднань (Таблиця 2), дані щодо значень ширини шва, одержані при зварюванні у різних просторових положеннях з використанням імпульсного режиму генерації лазерного випромінювання, вказані данні значно відрізняються (Рис. 7). Так, при імпульсному зварюванні вгору, різниця екстремальних значень характерних максимумів та мінімумів вказаних залежностей не перевищує 40%, тобто вони між собою відрізняються не більше ніж у 1,6 раз. А при імпульсному зварюванні на спуск, характерні значення екстремумів залежностей значень зміни ширини шва відрізняються майже у 1,8 раз (Рис. 7). При цьому значення зміни ширини шва у екстремальних точках, одержані при зварюванні на спуск та в гору при імпульсному режимі генерації лазерного випромінювання (при куті нахилу 45° для зварювання на спуск та 60° при зварюванні вгору), відрізняються менше ніж на 18%.

Коефіцієнт форми зварного шва є важливим параметром, який характеризує зварне з'єднання, та який виражається відношенням ширини шва до його товщини. У Таблиці 7 наведені дані, одержані в результаті аналізу макрошліфів зварних з'єднань з нержавіючої сталі AISI 321 товщиною 3 мм, одержаних лазерним зварюванням у різних просторових положеннях. На Рис. 8 побудовані відповідні залежності зміни коефіцієнта форми зварних з'єднань.

Таблиця 7 – Зміна коефіцієнта форми зварних з'єднань з нержавіючої сталі AISI 321 товщиною 3 мм, одержаних лазерним зварюванням у різних просторових положеннях

Кут нахилу, °	Коефіцієнт форми провару			
	вгору неперервний режим	вниз неперервний режим	вгору імпульсний режим	вниз імпульсний режим
0	0,54	0,54	0,81	0,81
30	0,71	0,59	0,98	0,81
45	0,44	1,43	0,73	0,78
60	0,47	0,42	0,55	0,62
90	0,75	0,76	0,6	1,03

Аналіз одержаних даних показує велику розбіжність між значеннями, одержаними у неперервному режимі генерації лазерного випромінювання при зварюванні на спуск. Так, з даних Таблиці 7 та Рис. 8 видно, що у неперервному режимі генерації лазерного випромінювання при куті зварювання 45° коефіцієнт форми провару становить 1,43, у той час коли його значення складає 0,42 при зміні кута нахилу з 45° на 60° . Тобто відносна різниця цих значень



становить майже 3,5 рази. У той час коли коливання значення коефіцієнта форми зварних з'єднань у неперервному режимі генерації лазерного випромінювання при зварюванні угору не перевищують 40%. Це дозволяє стверджувати про одержання більш стабільного коефіцієнта форми зварних з'єднань при зварюванні угору у неперервному режимі генерації лазерного випромінювання при зварюванні, а ніж при зварюванні на спуск.

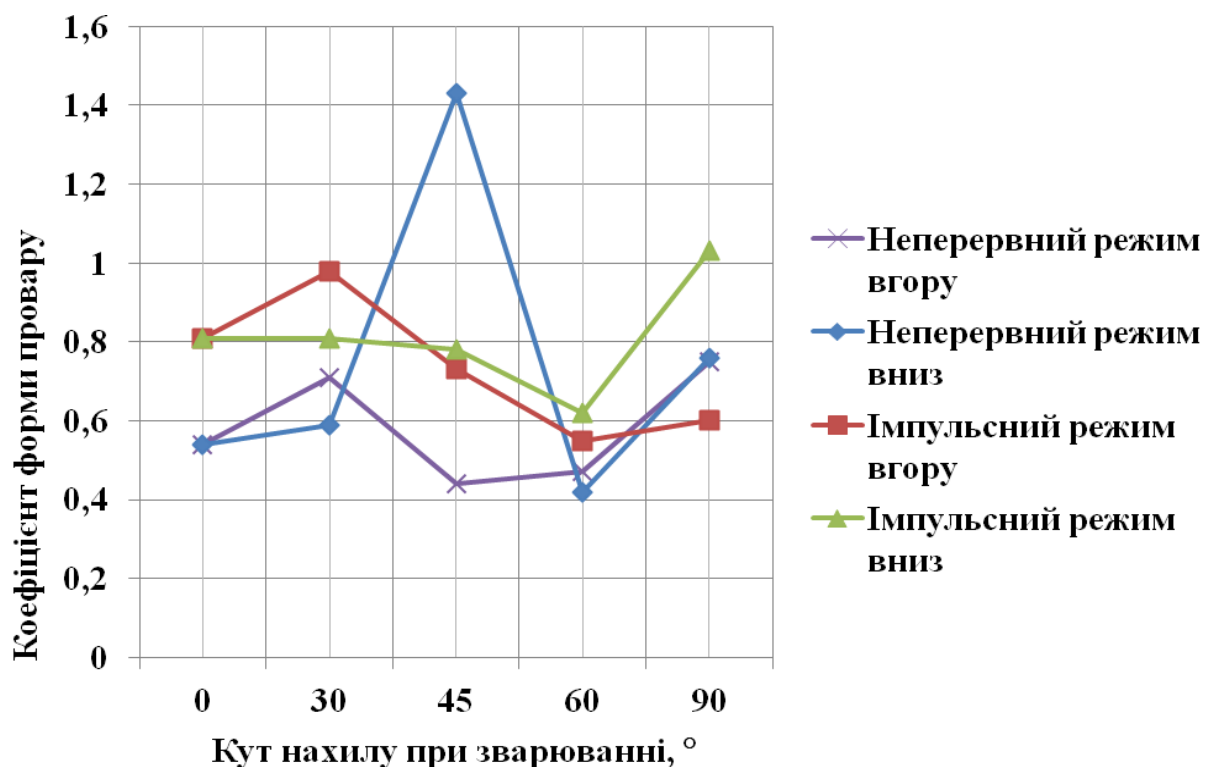


Рис. 8. Залежності зміни коефіцієнта форми зварних з'єднань з нержавіючої сталі AISI 321 товщиною 3 мм, одержаних лазерним зварюванням у різних просторових положеннях

Як показує аналіз даних Таблиці 7 та Рис. 8 коливання значення коефіцієнта форми зварних з'єднань у імпульсному режимі генерації лазерного випромінювання при зварюванні як угору, так й на спуск складають близько 40%. При цьому варто відзначити, що відносна різниця значень між значеннями коефіцієнта форми зварних з'єднань у імпульсному режимі генерації лазерного випромінювання при зварюванні як угору, так й на спуск для відповідних різних просторових положень становить близько 10%, майже для всіх значень кута нахилу, окрім 90°, коли це відношення наближається до 40%

Аналіз результатів досліджень виконаних на плоских зразках та описаних вище, дозволив виконати вибір просторових положень та підібрати параметри рекомендованих технологічних режимів, на яких були виготовлені контрольні стикові з'єднання зі сталі AISI 321 товщиною 3,0 мм. При виборі просторових положень керувалися наступними показниками: досягненням максимальної глибини провару; формуванням заданої геометрії зварного з'єднання; відсутності (або мінімальної кількості бризок); відсутності (або мінімальної



величини) утоніння; відсутності (або мінімальної величини) «гребінця» верхнього валика. Виходячи з цих даних, були обрані нижнє та вертикальне просторові положення, на яких, відповідно, було одержано якісні зварні з'єднання, що відповідають вище переліченим вимогам. Схожі за геометрією зварні з'єднання були одержані при наступних режимах: імпульсний режим генерації лазерного випромінювання, при максимальній потужності 4,4 кВт, частоті 250 Гц, імпульс 75/25 (для обох положень); розфокуванні -1 мм; швидкості зварювання 3000 мм/хв (для нижнього положення) та 4500 мм/хв (для вертикального положення). У всіх випадках зварювання проводилося з подачею аргону в вигляді захисного газу з різними витратами в певні області: в область зварювальної ванни 30 л/хв; в «хвіст» зварювальної ванни, для захисту остигаючого металу – 20 л/хв.

Висновки

За результатами виконаних досліджень можна зробити висновок про перспективність застосування зміни просторового положення деталей при лазерному зварюванні. Так, при зміні з нижнього на вертикальне положення при зварюванні стикових з'єднань зі сталі AISI 321 товщиною 3,0 мм, можливо збільшення швидкості зварювання на у 1,5 рази зі збереженням необхідних показників якості зварних з'єднань. При цьому не збільшується пороутворення та забезпечується підвищення міцності зварних з'єднань до 15%, за рахунок подрібнення структури.