

Бернацький А. В., Сіора О. В., Юрченко Ю. В., Соколовський М. В., Шамсутдінова Н. О.
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України

ВІДПРАЦЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЛАЗЕРНОГО БАГАТОПРОХІДНОГО ЗВАРЮВАННЯ СТИКОВИХ З'ЄДНАНЬ ТЕПЛОСТІЙКОЇ СТАЛІ 25X2НМФА

При виготовленні конструкцій з теплостійких сталей застосовують різні способи дугового зварювання. Високі значення тепловкладення і погонної енергії призводять до формування мікроструктури перегрівання в шві і зоні термічного впливу (ЗТВ), що сприяють утворенню гарячих і холодних тріщин, а також зниженню ударної в'язкості. Сучасний період розвитку технологій зварювання характеризується все більшим поширенням застосування лазерного процесу при виготовленні та ремонті відповідальних товстостінних виробів із легованих високоміцних сталей. Значною мірою це обумовлено розробкою більш потужних, економних та дешевих лазерів нового покоління та способів гібридних та комбінованих лазерне-дугових, лазерне-плазмових та подібних процесів. Лазерне зварювання товстостінних деталей пов'язано з подоланням значних технологічних труднощів, які обумовлені особливостями самого лазерного випромінювання та конструкції зварюваної розробки товстого металу. В результаті проведених досліджень розроблено та відпрацьовано технологію лазерного зварювання кореневих швів стикових з'єднань теплостійкої сталі 25X2НМФА без присадкового дроту та з присадним дротом. Досліджено вплив обробки кромки стиків на геометрію зварних з'єднань. Вибрано U-подібне оброблення кромки, що сприяє отриманню швів з високою якістю та гарним формуванням зворотного валика. Визначено раціональні діапазони зміни режимів зварювання для кореневого шва та наступних проходів. Виконано оцінку варіантів двох технологічних схем заповнення розробки кромки. Встановлено, що лазерне зварювання теплостійких сталей необхідно виконувати з попереднім та супутнім підігрівом до 250-300 °С. Показано, що багатопрохідне лазерне зварювання теплостійких сталей забезпечує необхідні механічні властивості металу шва та зварних з'єднань.

Ключові слова: теплостійка сталь, стикові зварні з'єднання великої товщини, лазерне зварювання, технологія, структура, механічні властивості.

ВСТУП

Високоміцні сталі є найбільш часто використовуваними матеріалами при виготовленні товстостінних виробів у важкій промисловості [1], енергетиці [2], суднобудуванні [3], виробництві труб [4] тощо. Як правило, для з'єднання товстостінних конструкцій використовуються процеси дугового зварювання. При зварюванні товстостінних виробів дуговими способами виникає низка технічних проблем [2]. Найбільш критичними проблемами є наступні: значні зварювальні напруження, викликані високим коефіцієнтом теплового розширення сталей; несплавлення між зварювальними шарами і бічними стінками розробки; гаряче розтріскування і пористість, що призводять до погіршення механічних властивостей, і зниження корозійної стійкості зварних компонентів. Ці проблеми можна подолати, впровадивши стратегію виготовлення, яка забезпечує більш високі швидкості зварювання при високій щільності тепловкладення і конфігурації з'єднання з вузькою шириною зазору [5].

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

У тепловій енергетиці для виготовлення обладнання та трубопроводів використовують теплостійкі складнолеговані Cr-Mo та Cr-Mo-V сталі [2], які призначені для тривалої роботи при температурі 450...600°C. Характерна особливість цих сталей – велика чутливість до швидкостей охолодження. Внаслідок різних швидкостей охолодження навіть при однаковому хімічному складі можуть утворюватися різні структури, і метал буде мати різні механічні властивості при нормальних і високих температурах. Зварювання теплостійких сталей супроводжується зміною властивостей зварюваного металу, яке пов'язане з розплавленням, кристалізацією і структурними змінами ЗТВ. При цьому утворюється фізико-хімічна неоднорідність зварних з'єднань, яка може погіршити працездатність і експлуатаційну надійність конструкцій. Тому потрібно проводити контроль теплових режимів: попереднього підігріву, термічного режиму зварювання, повільного охолодження або нагріву після зварювання, термічної обробки після зварювання [6].

При виготовленні конструкцій з теплостійких сталей застосовують різні способи дугового зварювання. Високі значення тепловкладення і погонної енергії призводять до формування мікроструктури перегрівання в шві і зоні термічного впливу (ЗТВ), що сприяють утворенню гарячих і холодних тріщин, а також зниженню ударної в'язкості [2, 4, 6].

Методам лазерного і електронно-променевого зварювання приділяється все більше уваги при зварюванні сталей товстого перетину завдяки їх високій ефективності зварювання і низьким

деформаціям при дуже вузьких зварних швах з глибоким проникненням. Хоча в деяких випадках доведено, що електронно-променеве зварювання дозволяє зварювати пластини товщиною більше 50 мм, а іноді і більше 100 мм за один зварювальний прохід, його основним недоліком є те, що для реалізації даного процесу потрібні вакуумні камери низького тиску та наявність жорстких вимог щодо допусків на ширину зазору, які неможливо реалізувати при виготовленні металевих конструкцій для суднобудування і трубопровідного транспортування вуглеводів [7]. Особливості лазерного зварювання полягають в істотній залежності ефективного ККД від параметрів режиму зварювання – потужності та щільності лазерного випромінювання, швидкості зварювання, фокусної відстані, заглиблення фокальної площини. Оптимальними є діаметр і потужність променя, що забезпечують вузьке і глибоке проплавлення з відношенням глибини до ширини більше 3. В цьому випадку ефективний ККД має максимальну величину, зварювання здійснюється з мінімальною погонною енергією, що забезпечує якісне формування шва і мінімальну ширину ЗТВ.

Як уже зазначалося, сучасний період розвитку технологій зварювання характеризується все більшим поширенням застосування лазерного процесу при виготовленні та ремонті відповідальних товстостінних виробів із легованих високоміцних сталей [5, 8-10]. Значною мірою це обумовлено розробкою більш потужних, економних та дешевих лазерів нового покоління та способів гібридних та комбінованих лазерне-дугових, лазерне-плазмових та подібних процесів. Лазерне зварювання товстостінних деталей пов'язано з подоланням значних технологічних труднощів, які обумовлені особливостями самого лазерного випромінювання та конструкції зварюваної розробки товстого металу [8]. Лазерне випромінювання у фокальній точці має малий діаметр (менше 1 мм), що при наявності зазору між крайками призводить до появи в шві дефекту «непровару»; спроможність його до відбивання від поверхонь, або його поглинання ними, знижує ефективність теплової дії випромінювання. Особливо значну шкоду завдає так званий «плазмовий факел», який крім зниження ККД лазерного нагрівання, ще й сприяє розбризкуванню металу та утворенню дефектів в зварному шві. Обробка крайок товстостінних деталей та зібрання їх майже без зазору для зварювання потребує спеціального обладнання. Для запобігання утворення дефекту «непровару», застосовують конструкцію розроблення типу «вузької щілини» та способу гібридного зварювання з присадним металом та захисним газом. Незначна ширина між крайками (20...30 мм) глибокого розроблення значно ускладнюють застосування додаткових пристроїв для подачі присадного металу та захисного газу, а також здійснення контролю за процесом зварювання. Велика кількість публікацій про розробку технологій та патентів на винаходи нових способів лазерного зварювання, свідчать, що труднощі лазерного зварювання товстостінних деталей ще не подолані. Це робить актуальним проведення наукових та технологічних робіт в цьому напрямку.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є розробка і відпрацювання технології лазерного багатопрохідного зварювання стикових з'єднань теплостійкої сталі 25X2НМФА, яка використовується при виготовленні роторів потужних парових турбін.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні задачі:

1. дослідити вплив конструкції обробки кромки стиків на геометрію зварних з'єднань;
2. визначити діапазон зміни режимів зварювання;
3. оцінити варіанти технологічних схем заповнення розробки кромки;
4. дослідити мікроструктуру металу шва та ЗТВ зварних з'єднань;
5. встановити залежність зміни механічних характеристик металу шва та ЗТВ зварних з'єднань від тривалості високотемпературного відпуску.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Зварювання стикових зварних з'єднань (товщиною $\delta=30$ мм) зі сталі 25X2НМФА, виконували твердотільним лазером DY044. Потужність випромінювання змінювали від 2,5 до 4 кВт. Випромінювання фокусували лінзою з фокусною відстанню 200 мм. Заглиблення фокуса під поверхню зразку, який зварювали, становила -2 мм на кожному проході. Зварювання виконували за допомогою головки, встановленої на трикоординатному маніпуляторі. Зону дії лазерного випромінювання у всіх випадках захищали вуглекислотою, який подавали в голову ванни і аргоном, який подавали у хвіст ванни. Для попередження утворення пор і досягнення необхідної якості з'єднань застосовували наступні способи: попередню підготовку крайок, що зварюють, і присаджувальних матеріалів, ретельний захист зони зварювання газами, а також легування металу зварних швів такими елементами, як Si, Mn – для розкислення. Для захисту була спеціально створена конструкція, яка захищає і голову і хвіст ванни розплаву.

За допомогою лазерного випромінювання зразки зі сталі 25X2НМФА проварювали наплавочними швами і зварювали встик. При цьому визначали найбільш раціональні режими процесу, властивості і структурні особливості з'єднань, одержаних як без подачі присаджувального дроту, так і з його подачею. В якості присаджувального матеріалу використовували дріт Св-08ХН2ГМЮА (Ø 1,2 мм). Збирання під зварювання виконувалось без зазору. З обох сторін приварювалися вивідні планки.

У табл. 1 наведені режими лазерного зварювання, на яких одержано якісні кореневі шви із повним проваром без прожогів.

Таблиця 1 – Режими лазерного зварювання стикових з'єднань сталі 25X2НМФА

Режими зварювання	Потужність, кВт	Швидкість зварювання, м/год	Витрати газу, л/хв.	Швидкість подачі дроту, м/год.
Без присадки	4	16	20 л/хв. – CO ₂ – в голову ванни 10 л/хв. – Ar – в хвіст ванни	-
З присаджувальним дротом Ø1,2 мм	4	16	20 л/хв. – CO ₂ – в голову ванни 10 л/хв. – Ar – в хвіст ванни	38,4

Було досліджено кілька варіантів обробки кромки стиків. Найкращою формою виявилася U-подібна обробка (рис.1). Притуплення завжди було 5 мм. При виборі типу обробки прагнули отримати, з одного боку, зварне з'єднання з хорошим проваром кореня шва при мінімальній витраті наплавленого металу, з іншого боку, просту – у виготовленні кромки, придатну для серійного випуску.

U-подібна підготовка кромки порівняно з V-подібною вимагає меншої кількості наплавленого металу, а також за рахунок ширшої обробки в корені шва полегшує ведення процесу при накладенні першого кореневого шва. Крім того, перевагою даної обробки при її заповненні є можливість отримання безперервного багатощарового шва з шлаком, що самостійно сколюється. При зварюванні з V-подібною обробкою шов має ослаблений переріз, втягнутий всередину зі зворотного боку обробки (рис.1), і по зоні слабину можуть утворюватися тріщини кристалізації, так як вся теплова енергія, яку дає лазер, витрачається на тепловідведення кромки.

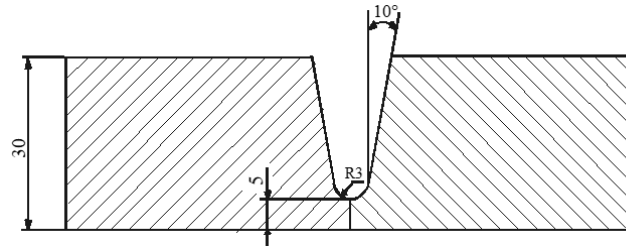


Рисунок 1 – U-подібна розробка крайок із притупленням, при лазерному зварюванні якого формується якісний кореневий шов із валиком зворотного підсилення на зразках сталі 25X2НМФА.

При зварюванні зразків із сталі 25X2НМФА для попередження виникнення холодних тріщин був застосований попередній підігрів до температур 250...300°C. Такий підігрів знижує швидкість охолодження після зварювання, зменшує вміст дифузної водню і знижує рівень зварювальних напруг. Для виконання попереднього підігріву був зроблений спеціальний пристрій, термічний елемент якого знаходився безпосередньо під зразком. Цей елемент становив собою пластину з нержавіючої сталі товщиною 1,0 мм, яка була зігнута у вигляді зміювика. Таким чином, було реалізовано резистивний спосіб нагріву. Для живлення системи підігріву було використано трансформатор для контактного зварювання ТК-3207 із ступінчастим регулюванням вторинної напруги в межах U=4,6...6,5 В. Межі регулювання струму в залежності від напруги і температури нагріву зразку становили від 800 до 1200 А. Найбільша потужність, яка була застосована для нагріву

зразку, становила $P_n=7,8$ кВт. Температура зразка під час досліджень вимірювалася термопарою, сигнал від якої реєструвався самопишучим потенціометром КСП-4.

Лазерне багатопрхідне зварювання теплостійкої сталі 25Х2НМФА виконувалося при горизонтальному розташуванні стикового з'єднання (рис.2) $300 \times 150 \times 30$ мм, на одному робочому місці.



Рисунок 2 – Стиконе з'єднання сталі 25Х2НМФА ($\delta=30$ мм) у зборі, зварене лазерним способом з присаджувальним дротом із підігрівом.

Складання під подальше зварювання проводилося без зазору, з U-подібною розробкою крайок і притупленням у корені 5 мм, згідно схемі рис.3. Було зварено жорстко закріплені стики. Жорсткість стикового з'єднання досягалася приварюванням до пластин поперечних ребер з прямокутника перетином 26×35 мм, довжиною 150 мм. З обох боків були приварені вивідні планки товщиною 5 мм для початку та наприкінці зварного з'єднання (рис.3).

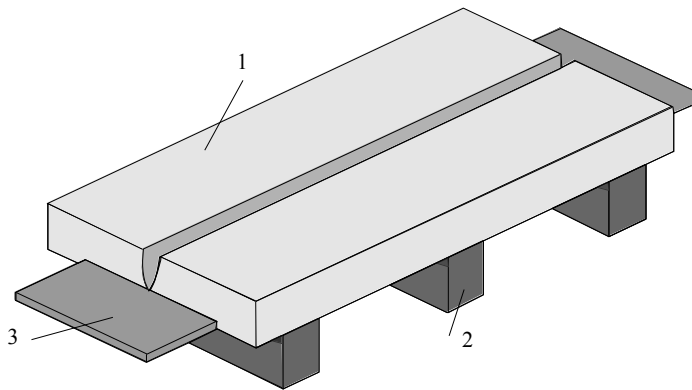


Рисунок 3 – Стиконе з'єднання роторної сталі 25Х2НМФА де 1- пластина; 2- ребро жорсткості; 3 – вивідна планка.

При виконанні багатопрхідних з'єднань із комплексно легованої сталі 25Х2НМФА ($\delta=30$ мм) найбільші труднощі виникають при зварюванні першого (кореневого) проходу. Вони обумовлені підвищеною небезпекою утворення несплавень, тріщин і пор. Кореневий шов виконували лазерним зварюванням з попереднім підігрівом $250-300^\circ\text{C}$ без присаджувального дроту. При цьому у всіх зварених з'єднаннях із сталі 25Х2НМФА утворювалися тріщини в корневих швах, незважаючи на проведення попереднього підігріву. Аналіз причин утворення цих тріщин показав, що висота кореневого валика не може витримувати рівня тимчасових та залишкових напружень, що утворюються при зварюванні. Тому, було прийняте рішення зварювати кореневий прохід з підігрівом і присаджувальним дротом Св-08Г2С ($\text{Ø}1,2$ мм). Такий прийом дозволив усунути тріщиноутворення за рахунок легування металу шва.

Зварювання кореневого шва виконувалося на наступних режимах: потужність випромінювання $P=4$ кВт, швидкість зварювання $V_{зв}=16$ м/год., швидкість подачі дроту $V_{пр}=100$ м/год., фокусна відстань $F=200$ мм, заглиблення фокусу $\Delta F=-2$ мм. Витрати захисного газу: у голову ванни CO_2 $Q=20$ л/хв., у хвіст ванни Ar $Q=14$ л/хв. Наступний після кореневого шва прохід виконувався з підігрівом до $250^\circ C$ і з подачею дроту Св-08ХН2ГМЮА діаметром 1,2 мм на режимі: потужність випромінювання $P=3$ кВт, швидкість зварювання $V_{зв}=16$ м/год., швидкість подачі дроту $V_{пр}=100$ м/год, фокусна відстань $F=200$ мм, заглиблення фокусу $\Delta F=-2$ мм. Як показав досвід, цей режим доцільно застосовувати для уникнення прожогів кореневого шва при подальшому заповненні розробки крайок на звичайних режимах. Зварювання наступних проходів виконували на тому ж режимі, щой для кореневого шва.

Для зварювання стикового з'єднання з товстолистової сталі 25Х2НМФА була обрана вузька U-подібна розробка крайок зі скосом крайок під кутом 12° (рис.1) і шириною вгорі 7 мм. Заповнення розробки проводилося в один валик (рис.4). Присаджувальний дріт подавали в передню частину зварювальної ванни по центру зазору. Зварювання останніх (верхніх) шарів виконували у два паралельні проходи (рис.4). Але після проведення металографічного аналізу було встановлено, що при зварюванні у вузьку розробку мають місце несплавлення зі стінками зварюваних зразків (рис.5). Такі не сплавлення можна вважати характерним дефектом. Усунути його можливо за рахунок зміни форми розробки крайок і переходу від зварювання «в один валик» до розташування проходів у шаховому порядку. Тому для подальших досліджень зразків із сталі 25Х2НМФА ($\delta=30$ мм), було обрано U-подібне оброблення кромки зі скосом кромки під кутом 10° та шириною вгорі 12 мм.

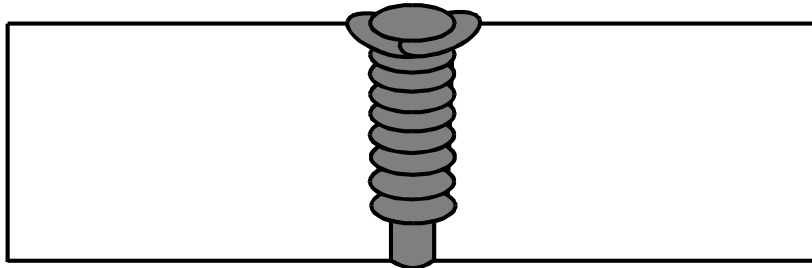


Рисунок 0 – Схема заповнення розробки крайок



Рисунок 5 – Макрошліф багатопрохідного зварного з'єднання одержаного лазерним зварюванням у вузьку розробку.

Лазерне випромінювання фокусували на кінці присаджувального дроту, який подавали в зону зварювання під кутом 45° . При заповненні розробки з кожним проходом виконувався зсув дроту вліво й вправо на 1 мм від центру (рис.6). Таким чином заповнення розробки вели не «в один валик», а у шаховому порядку. Після кореневого проходу проварювали по центру ще один прохід, а потім заповнення здійснювали у 2 валика. У верхній частині зразку, де розробка крайок розширюється, розкладку здійснювали по 3 паралельні валики в шарі. Макроструктура одержаного таким чином зварного з'єднання показана на рис.7.

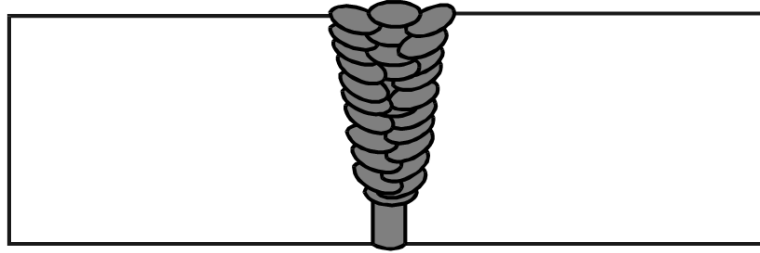


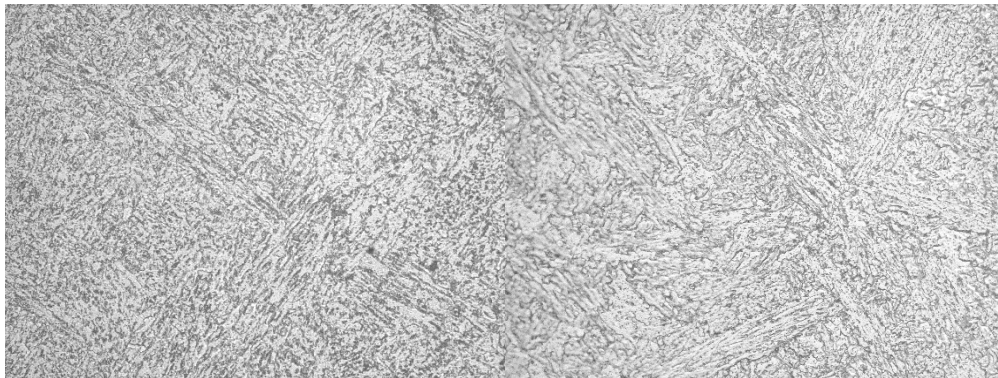
Рисунок 6 – Покращена схема заповнення розробки крайок.



Рисунок 7 – Макроструктура зразку якісного багатопрхідного лазерного зварювання стикового з'єднання сталі 25X2НМФА ($\delta=30$ мм) з підігрівом.

Дослідження макроструктури звареного з'єднання показали, що метал шва й колошовної зони щільний, без пор, тріщин та інших дефектів.

На рис.8-12 наведено фотографії мікросліфів основного металу, зони термічного впливу та металу шва після відпуску протягом 2-х годин та 30 годин. Мікроструктура основного металу після відпуску протягом 2-х годин є бейнітом (рис.8.а). За тривалого відпуску (30 годин) спостерігається збільшення зерна бейніту (рис.8.б).



а

б

Рисунок 8 – Мікроструктура основного металу зі сталі 25X2НМФА після відпуску, $\times 500$: а – після відпуску 630°C – 2 години; б – після відпуску 630°C – 30 годин.

Мікроструктура металу шва складається також із бейніту (рис.9.а). Після відпуску протягом 30 годин величина зерна металу шва збільшується спостерігаються тонкі переривчасті прожилки фериту (рис.9.б). При розгляді мікроструктури навколошовної зони поблизу лінії сплавлення в нижній та середній частині перерізу зварних з'єднань після відпуску протягом 2 годин ділянки великого зерна не спостерігаються. Тут утворюється дрібногольчастий бейніт.

У верхній частині зварного з'єднання є ділянка великого зерна (рис.9.а). Вона має структуру крупногольчастого бейніту. Такий характер мікроструктури зварного з'єднання показує, що в умовах багатозарового безперервного зварювання має місце нормалізація металу шва. Висока температура звареного раніше шару створює умови для нагрівання його до температури перекристалізації при

накладенні наступного шару шва (рис.9). Це сприяє зниженню швидкості охолодження металу шва, що унеможливає утворення закаловальних структур.

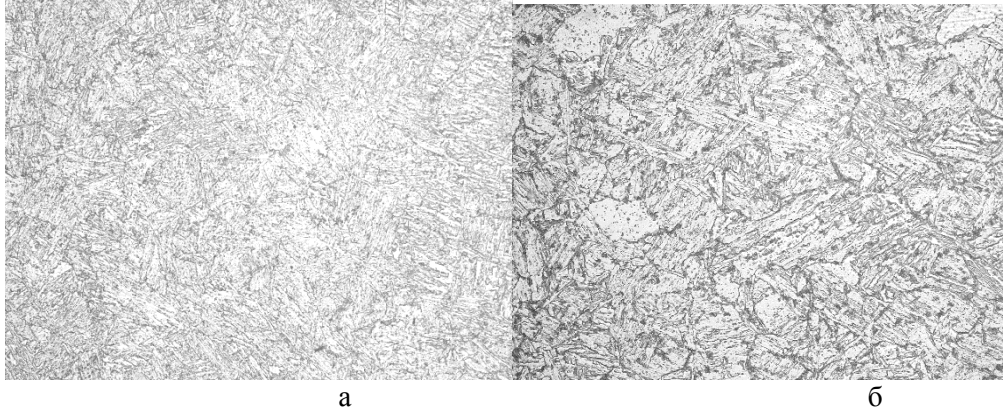


Рисунок 9 – Мікроструктура шва на сталі 25X2НМФА, виконаного лазерним зварюванням після відпуску, $\times 500$: $\times 500$: а – після відпуску 630°C – 2 години; б – після відпуску 630°C – 30 годин.

Після тривалого відпуску у структурі навколошовної зони біля границі сплавлення помітна поява більших голок бейніту (рис.10.б).

У міру віддалення від межі сплавлення величина зерна зменшується, ділянка нормалізації має бейнітну структуру з дрібними зернами (рис.11.а). Тривалий відпуск зварних з'єднань призводить до деякого збільшення голок бейніту (рис.11.б). Структура ділянки переходу навколошовної зони до основного металу є бейнітом (рис.12.а). Тривалий відпуск зварних з'єднань призводить до деякого збільшення феритної фази (рис.12.б).

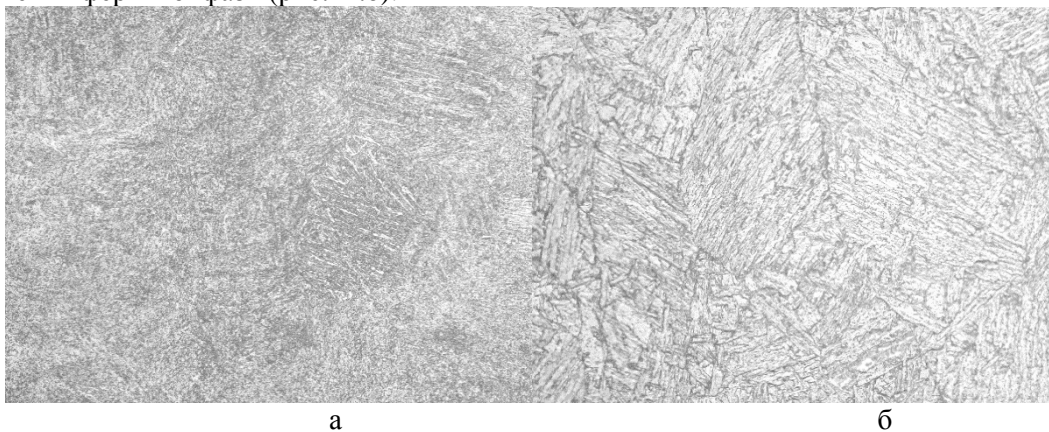


Рисунок 10 – Мікроструктура лінії сплавлення зварного з'єднання сталі 25X2НМФА, $\times 500$: а – після відпуску 630°C – 2 години; б – після відпуску 630°C – 30 годин.

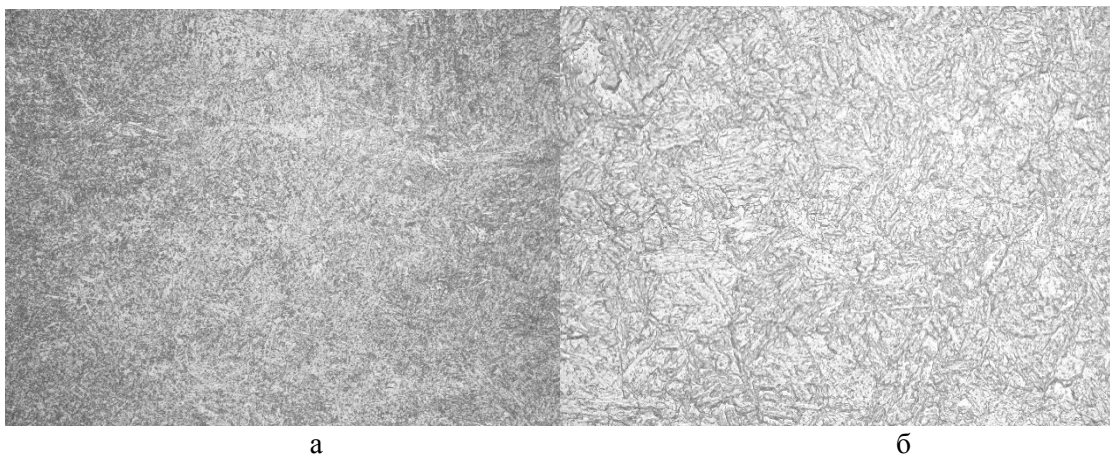


Рисунок 11 – Ділянка дрібного зерна навколошовної зони зварного з'єднання сталі 25X2НМФА, $\times 500$: а – після відпуску 630°C – 2 години; б – після відпуску 630°C – 30 годин.

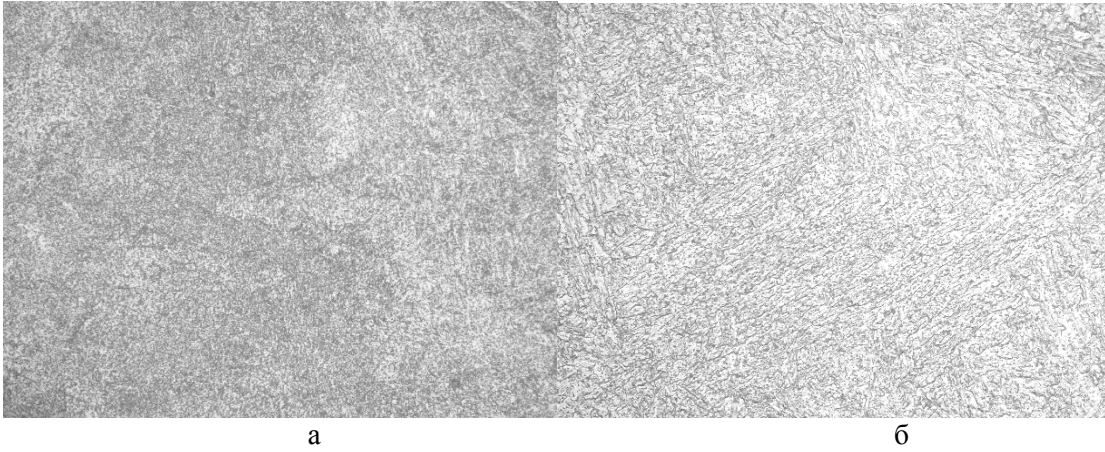


Рисунок 12 – Ділянка неповної перекристалізації навколошовної зони зварного з'єднання сталі 25X2NMFA, $\times 500$: а – після відпуску 630°C – 2 години; б – після відпуску 630°C – 30 годин.

Характер зміни твердості у зварних з'єднаннях сталі 25X2NMFA наведено на рис.13.

Зона термічного впливу поблизу межі сплаву має найбільшу твердість (до 358 HV). У міру віддалення від межі сплавлення твердість знижується. Метал шва має підвищену жорсткість (269-280 HV) порівняно з основним металом (220 HV).

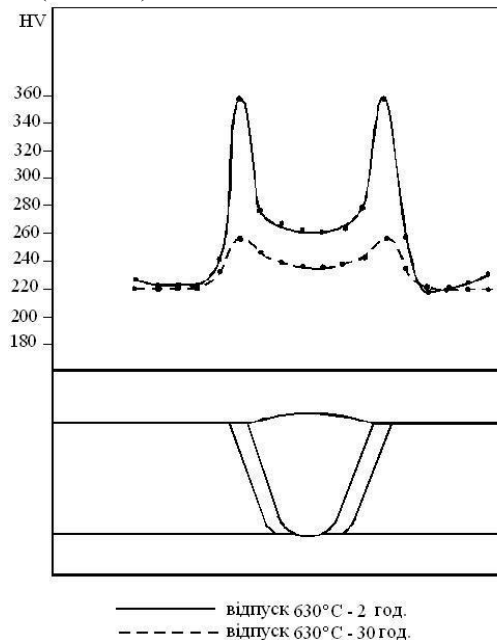


Рисунок 13 – Розподіл твердості у зварному з'єднанні із сталі 25X2NMFA в залежності від тривалості процесу відпуску.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Відомо [2], що тривалий відпуск зварних з'єднань роторних сталей (30 годин) призводить до зниження твердості. В основному металі твердість залишається незмінною. Особливо помітно падіння твердості у зоні термічного впливу (256 HV). У металі шва твердість лише на рівні 230-240 HV.

Дослідження мікроструктури та твердості зварних з'єднань зварених лазерним випромінюванням показало, що високий відпуск на протязі 30 годин після зварювання вносить помітні зміни: знижується твердість, збільшуються розміри зерна.

Таким чином, з наведених даних видно, що характер мікроструктури зварних з'єднань сталі 25X2NMFA добре узгоджується з показниками розподілу твердості.

Хімічний склад металу шва визначався на окремих ділянках спектральним аналізом. Схема проведення спектрального аналізу на темплеті зварного з'єднання показана на рис.14. Хімічний склад металу шва наведено в табл.2.

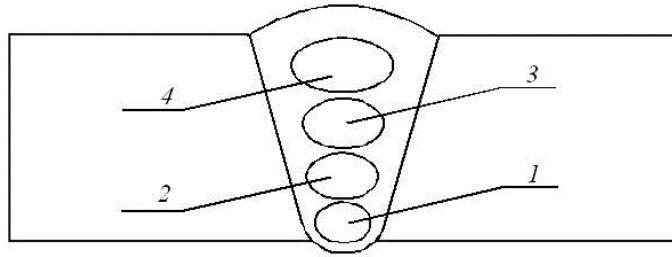


Рисунок 10 – Схема послідовності виконання спектральних аналізів ділянок зварного шва (див. табл.2).

Таблиця 2 – Хімічний склад металу шва.

Ділянка шва	Вміст елементів, %								
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Mg	V	
1	0,07	0,35	0,97	0,97	2,51	0,39	0,08		
2	0,06	0,35	0,99	0,98	2,53	0,40	0,06		
3	0,06	0,32	1,00	0,92	2,45	0,51	0,05		
4	0,06	0,41	1,08	0,92	2,52	0,55	0,04		

Результати наведені у таблиці 2 свідчать, що метал шва сталі 25X2НМФА має рівномірний хімічний склад по всій площі поперечного перерізу стикового зварного з'єднання.

Метал зразків стикових зварних з'єднань сталі 25X2НМФА ($\delta=30$ мм) успішно пройшов випробування на статичний розтяг (рис.15). Всі зразки були зруйновані на значній відстані від шва та ЗТВ. При випробуваннях на розтяг всі зразки зварних з'єднань руйнувалися лише з основного металу з відривом 10-14 мм від лінії сплавлення. Межа міцності металу шва при цьому для сталі 25X2НМФА в середньому становить 677-687 МПа, що цілком відповідає вимогам.



Рисунок 15 – Зовнішній вигляд зразків зварних з'єднань із сталі 25X2НМФА після випробувань на статичний розтяг.

Зі зварених стиків вирізалися зразки типу II за ГОСТ 6996-66 для випробування механічних властивостей і зразки типу IX за ГОСТ 6996-66 для випробувань на ударну в'язкість. Механічні властивості зварного з'єднання наведені в табл.3.

Одним із важливих параметрів, що характеризують механічні властивості зварного з'єднання теплостійких сталей, до яких належить сталь 25X2НМФА, є ударна в'язкість. Останню визначали на стандартних зразках з V-подібним надрізом при температурах -20°C , $+20^{\circ}\text{C}$, $+350^{\circ}\text{C}$, при відпуску 630°C протягом 2-х годин та $+20^{\circ}\text{C}$ при відпуску протягом 30 годин. Ударна в'язкість знижується при негативній температурі (-20°C) до 15-38 Дж/см² і помітно підвищується при температурі $+350^{\circ}\text{C}$ до

53-114 Дж/см², при відпуску протягом 2-х годин. Ударна в'язкість металу шва під час відпуску зварних з'єднань протягом 30 годин зростає до 95-121 Дж/см².

Таблиця 3 – Тимчасовий опір розриву сталі 25Х2НМФА у зварному з'єднанні (товщиною $\delta=30$ мм) та ударна в'язкість металу шва.

Об'єкт досліджень	Термічна обробка	Тимчасовий опір розриву σ_B , МПа	Ударна в'язкість КСV, Дж/см ² при температурах, °С		
			+20	-20	+350
Зварне з'єднання сталі 25Х2НМФА	відп уск 2 год.	677-686	34-51	15-38	53-114
	відп уск 30 год.	-	95-121	-	-

З наведених у табл.3 даних видно, що присаджувальний дріт Св-08ХН2ГМЮ ($\varnothing 1,2$ мм) забезпечує такі властивості металу звареного шва після високого відпуску на протязі 30 годин при короточасних випробуваннях, які відповідають вимогам, пропонованим до зварних конструкцій із сталі 25Х2НМФА.

ВИСНОВКИ

1. Розроблено та відпрацьовано технологію лазерного зварювання кореневих швів стикових з'єднань корпусної теплостійкої сталі 25Х2НМФА без присадкового дроту та з присадним дротом.
2. Досліджено вплив обробки кромки стиків на геометрію зварних з'єднань. Вибрано U-подібне оброблення кромки, що сприяє отриманню швів з високою якістю та гарним формуванням зворотного валика..
3. Визначено раціональні діапазони зміни режимів зварювання для кореневого шва та наступних проходів.
4. Виконано оцінку варіантів двох технологічних схем заповнення розробки кромки. Запропоновано при заповненні розробки з кожним проходом виконувати зсув зварювальної системи вліво й вправо на 1 мм від центру. Таким чином заповнення заповнювати розробку не «в один валик», а у шаховому порядку. У верхній частині зразку, де розробка крайок розширюється, рекомендовано розкладку здійснювати по 3 паралельні валики в шарі.
5. Лазерне зварювання теплостійких сталей необхідно виконувати з попереднім та супутнім підігрівом до 250-300 °С.
6. Багатопродісне лазерне зварювання теплостійких сталей забезпечує необхідні механічні властивості металу шва та зварних з'єднань.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Mikosyanchyk O. O., Mnatsakanov R. H., Lopata L. A., Marchuk V. E., Yakobchuk O. E. Wear resistance of 30KhGSA steel under the conditions of rolling with sliding. *Materials Science*. 2019. Vol. 55, No. 3. P. 402-408. <https://doi.org/10.1007/s11003-019-00317-9>
2. Tsaryuk A.K., Levchenko E.V., Grishin M.M., Vavilov A.V., Kantor A.G., Bivalkevich A.I. Welding in power engineering industry of Ukraine. *The Paton Welding Journal*. 2020. No. 3. P. 19-24 <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.03.03>
3. Guo Y., Chen L., Wang H., Yi H. Experimental study of welding residual stress of high-strength shipbuilding steel. *Brodogradnja: Teorija i praksa brodogradnje i pomorske tehnike*. 2019. Vol. 70, No. 2. P. 17-32. <http://dx.doi.org/10.21278/brod70202>
4. Li L., Mi G., Zhang X., Xiong L., Zhu Z., Wang C. The influence of induction pre-heating on microstructure and mechanical properties of S690QL steel joints by laser welding. *Optics & Laser Technology*. 2019. Vol. 119. P. 105606. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.105606>
5. Бернацький А. В., Хаскін В. Ю., Сіора О. В., Лукашенко В. А. Перспективи лазерного та гібридного лазерно-дугового зварювання трубних сталей. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2022. Т. 3, № 82. С. 9-17. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2022.3.1>
6. Golański G., Ślania J., Sroka M., Wiczorek P., Urzysnicok M., Krawczyk R. Microstructure and mechanical properties of modern 11% Cr heat-resistant steel weld joints. *Materials*. 2021. Vol. 14, No. 12. P. 3430. <https://doi.org/10.3390/ma14123430>

7. Zhang Y., Gou G. Microstructure and properties of Co3W2 heat-resistant steel by vacuum electron beam welding. *International Journal of Modern Physics B*. 2020. Vol. 34, No. 01n03. P. 2040058. <https://doi.org/10.1142/S0217979220400585>
8. Wang C., Mi G., Zhang X. Welding stability and fatigue performance of laser welded low alloy high strength steel with 20 mm thickness. *Optics & Laser Technology*. 2021. Vol. 139. P. 106941. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.106941>
9. Poznyakov V. D., Markashova L. I., Shelyagin V. D., Zhdanov S. L., Bernatskyi A. V., Berdnikova O. M., Sydorets' V. M. Cold cracking resistance of butt joints in high-strength steels with different welding techniques. *Strength of Materials*. 2019. Vol. 51. P. 843-851. <https://doi.org/10.1007/s11223-020-00132-7>
10. Zhang H., Jiang M., Chen X., Wei L., Wang S., Jiang Y., Chen, Y. Investigation of weld root defects in high-power full-penetration laser welding of high-strength steel. *Materials*. 2022. Vol. 15, No. 3. P. 1095. <https://doi.org/10.3390/ma15031095>

REFERENCES

1. Mikosyanchyk, O. O., Mnatsakanov, R. H., Lopata, L. A., Marchuk, V. E., & Yakobchuk, O. E. (2019). Wear resistance of 30KhGSA steel under the conditions of rolling with sliding. *Materials Science*, 55(3), 402-408. <https://doi.org/10.1007/s11003-019-00317-9>
2. Tsaryuk A.K., Levchenko E.V., Grishin M.M., Vavilov A.V., Kantor A.G. & Bivalkevich A.I. (2020). Welding in power engineering industry of Ukraine. *The Paton Welding Journal*, (3), 19-24 <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.03.03>
3. Guo, Y., Chen, L., Wang, H., & Yi, H. (2019). Experimental study of welding residual stress of high-strength shipbuilding steel. *Brodogradnja: Teorija i praksa brodogradnje i pomorske tehnike*, 70(2), 17-32. <http://dx.doi.org/10.21278/brod70202>
4. Li, L., Mi, G., Zhang, X., Xiong, L., Zhu, Z., & Wang, C. (2019). The influence of induction pre-heating on microstructure and mechanical properties of S690QL steel joints by laser welding. *Optics & Laser Technology*, 119, 105606. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.105606>
5. Bernatskyi, A. V., Khaskin, V. Yu., Siora, O. V., & Lukashenko, V. A. (2022). Perspektyvy lazernoho ta hibrydnoho lazerno-duhovoho zvariuvannia trubnykh stalei. *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*, (3 (82)), 9-17. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2022.3.1>
6. Golański, G., Słania, J., Sroka, M., Wiczorek, P., Urzunicok, M., & Krawczyk, R. (2021). Microstructure and mechanical properties of modern 11% Cr heat-resistant steel weld joints. *Materials*, 14(12), 3430. <https://doi.org/10.3390/ma14123430>
7. Zhang, Y., & Gou, G. (2020). Microstructure and properties of Co3W2 heat-resistant steel by vacuum electron beam welding. *International Journal of Modern Physics B*, 34(01n03), 2040058. <https://doi.org/10.1142/S0217979220400585>
8. Wang, C., Mi, G., & Zhang, X. (2021). Welding stability and fatigue performance of laser welded low alloy high strength steel with 20 mm thickness. *Optics & Laser Technology*, 139, 106941. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.106941>
9. Poznyakov, V. D., Markashova, L. I., Shelyagin, V. D., Zhdanov, S. L., Bernatskyi, A. V., Berdnikova, O. M., & Sydorets', V. M. (2019). Cold cracking resistance of butt joints in high-strength steels with different welding techniques. *Strength of Materials*, 51, 843-851. <https://doi.org/10.1007/s11223-020-00132-7>
10. Zhang, H., Jiang, M., Chen, X., Wei, L., Wang, S., Jiang, Y. & Chen, Y. (2022). Investigation of weld root defects in high-power full-penetration laser welding of high-strength steel. *Materials*, 15(3), 1095. <https://doi.org/10.3390/ma15031095>

A. Bernatskyi, O. Siora, Yu. Yurchenko, M. Sokolovskyi, N. Shamsutdinova. Development of multi-pass laser welding technology for butt joints of 25Kh2NMF A heat-resistant steel

Various arc welding methods are used for manufacturing of structures from heat-resistant steels. High values of thermal and power inputs lead to the formation of an overheating microstructure in the weld as well as in the heat affected zone (HAZ), which contributes to the formation of hot and cold cracks, coupled with a reduction in its impact strength. The modern period of development of welding technologies is characterized by the increasing use of laser technology for the manufacture and repair of critical thick-walled products out of alloyed high-strength steels. The main reason for it lies largely on the development of more powerful, economical and cheaper generation of lasers, as well as methods of hybrid and combined laser-arc, laser-

plasma and similar processes. Laser welding of thick-walled parts is associated with overcoming significant technological difficulties due to the peculiarities of laser radiation and the design of the welded thick metal parts. As a result of the research, the technology of laser welding of weld roots in butt joints made out of heat-resistant 25Kh2NMFA steel with and without filler wire was developed and tested. The influence of joint edge processing on the geometry of welded joints was investigated. The U-shaped edge treatment was chosen, which contributes to the production of high-quality welds with good formation of the back roll. The rational ranges of changes in welding modes for the weld root and subsequent passes were determined. The evaluation of variants for two technological schemes for filling the edge development was carried out. It is established that laser welding of heat-resistant steels should be performed with preliminary and concomitant heating to the temperatures of 250-300 °C. It is shown that multi-pass laser welding of heat-resistant steels provides the required mechanical properties of the weld metal and welded joints.

Keywords: heat-resistant steel, butt welded joints of large thickness, laser welding, technology, structure, mechanical properties.

БЕРНАЦЬКИЙ *Артемій Володимирович*, кандидат технічних наук, старший дослідник, завідувач відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання», Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України, e-mail: Bernatskyi@paton.kiev.ua. <https://orcid.org/0000-0002-8050-5580>

СІОРА *Олександр Васильович*, науковий співробітник відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання», Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України, e-mail: siora@ua.fm. <https://orcid.org/0000-0003-1927-790X>

ЮРЧЕНКО *Юрій Вікторович*, аспірант, інженер-технолог I категорії відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання», Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України, e-mail: yuriyyurchenko14@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0001-9253-009X>.

СОКОЛОВСЬКИЙ *Микола Володимирович*, аспірант, провідний інженер відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання», Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України, e-mail: m_sokolovskyi@paton.kiev.ua. <https://orcid.org/0000-0003-3243-5060>.

ШАМСУТДІНОВА *Наталія Олександрівна*, інженер відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання», Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України, e-mail: shamsutaliia@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-3525-0080>

Artemii BERNATSKYI, *Candidate of Technical Sciences*, Senior Researcher, Head of the Department of the Specialized High-Voltage Engineering and Laser Welding, *E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine*, e-mail: Bernatskyi@paton.kiev.ua. <https://orcid.org/0000-0002-8050-5580>

Oleksandr SIORA, Researcher of the Department of the Specialized High-Voltage Engineering and Laser Welding, *E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine*, e-mail: siora@ua.fm. <https://orcid.org/0000-0003-1927-790X>

Yurii YURCHENKO, Postgraduate Student, Engineer-technologist First Category of the Department of the Specialized High-Voltage Engineering and Laser Welding, *E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine*. e-mail: yuriyyurchenko14@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0001-9253-009X>.

Mykola SOKOLOVSKYI, Postgraduate Student, Senior Engineer of the Department of the Specialized High-Voltage Engineering and Laser Welding, *E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine*. e-mail: m_sokolovskyi@paton.kiev.ua. <https://orcid.org/0000-0003-3243-5060>.

Nataliia SHAMSUTDINOVA, Engineer of the Department the Specialized High-Voltage Engineering and Laser Welding, *E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine*, e-mail: shamsutaliia@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-3525-0080>

DOI 10.36910/automash.v2i21.1206