

УДК 621.791.725

[0000-0002-8050-5580] **А. В. Бернацький**, к.т.н.,
[0000-0001-8153-6533] **В. Д. Шелягін**, к.т.н., с.н.с.,
[0000-0002-8498-4726] **В. М. Сидорець**, д.т.н., професор,
[0000-0001-9754-9478] **О. М. Берднікова**, к.т.н., с.н.с.,
[0000-0003-1927-790X] **О. В. Сіора**, наук. співробітник,
[0000-0002-9582-5763] **Т. М. Набок**, мол. наук. співробітник

Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України
вул. Казимира Малевича, 11, м. Київ, 02150, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЛАЗЕРНОГО ЗВАРЮВАННЯ СТИКОВИХ З'ЄДНАНЬ З РІЗНОРІДНИХ НЕРЖАВІЮЧИХ АУСТЕНІТНИХ СТАЛЕЙ У ВЕРТИКАЛЬНОМУ ПРОСТОРОВОМУ ПОЛОЖЕННІ

Проблема ремонту колекторів парогенераторів атомних електростанцій (АЕС) на сьогоднішній день стала вкрай актуальною. Шлях герметизації теплообмінних трубок за допомогою заглушок є перспективним за умови забезпечення високої якості з'єднання. Практичний досвід застосування зварювання для вирішення цієї проблеми показав необхідність пошуку технологічних рішень, пов'язаних зі збільшенням глибини провару та зменшенням зони термічного впливу. Метою роботи було визначення технологічних особливостей лазерного зварювання з'єднань з різномірних нержавіючих аустенітних сталей у вертикальному просторовому положенні з подальшим застосуванням результатів для вирішення вищезазначеної проблеми. Було запропоновано два технологічні варіанти вварювання заглушок з використанням стикових прямолінійних та кільцевих з'єднань у вертикальному положенні з різними коефіцієнтами форми шва. Було відпрацьовано режими лазерного зварювання та виготовлено зразки зварних з'єднань. За результатами аналізу даних механічних випробувань, візуального та радіографічного контролю, випробувань на непроникність і металографічних досліджень визначено доцільні режими лазерного зварювання заглушок для кожного з двох варіантів. Основним типом було кільцеве стикове зварне з'єднання типу «пластина-труба» зі сталей 10X18H10T (труба) і 10X17H13M3T (пластина), виконане у вертикальному положенні. Дані механічних випробувань на статичний розтяг свідчать, що для зварних з'єднань з коефіцієнтом форми шва, більшим одиниці, забезпечується значення зусилля руйнування приблизно на 11 % вище порівняно зі з'єднаннями з коефіцієнтом форми шва, меншим одиниці. Встановлено основні причини виникнення дефектів при лазерному зварюванні кільцевих зварних з'єднань з різномірних нержавіючих сталей та запропоновано методики їх усунення та запобігання їх утворенню. Розроблено базові технологічні прийоми лазерного зварювання кільцевих зварних з'єднань з різномірних сталей у різних просторових положеннях. На основі результатів проведених досліджень сформульовано технологічні рекомендації з лазерного зварювання заглушок у теплообмінні трубки колектору, що значно удосконалить технології ремонту парогенераторів атомних електростанцій.

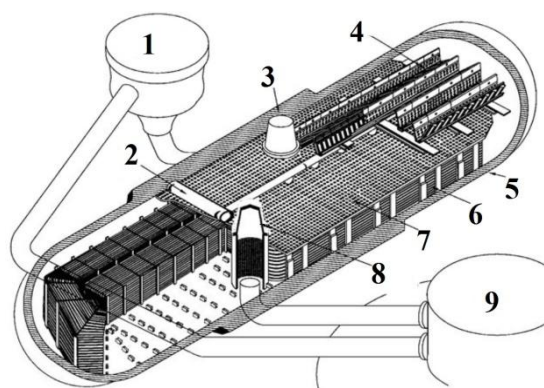
Ключові слова: лазерне зварювання, кільцеві стикові з'єднання, нержавіючі сталі, різномірні зварні з'єднання, просторе положення, парогенератор, АЕС, ремонт.

Вступ. В енергетиці (на атомних і теплових електростанціях), авіа- та ракетобудуванні, хімічній, харчовій та інших галузях промисловості широко застосовуються теплообмінні апарати [1-3], які призначені для обміну тепловою енергією між двома або кількома твердими, рідкими, газоподібними середовищами у різних комбінаціях [4-6]. У зв'язку з цим досить часто для одержання високих експлуатаційних властивостей тепло-

обмінних апаратів у їх конструкціях застосовують складові комбіновані вузли з різномірних металів [7-9]. У цьому випадку найбільш повно реалізуються переваги кожного з них. У той же час ускладнюється задача виготовлення і ремонту таких конструкцій у разі необхідності застосування технологій зварювання, адже зварювання різномірних металів є більш складним, ніж зварювання однорідних [10-12]. Прикладом необхідності виконання

такого зварювання є встановлення заглушок для герметизації теплообмінних труб у колекторах парогенераторів типу ПГВ-1000М для їх ремонту.

В Україні на чотирьох діючих атомних електростанціях експлуатується 15 атомних енергоблоків, з яких 13 – типу ВВЕР-1000 і два – ВВЕР-440, загальною встановленою потужністю 13 835 МВт [2]. Парогенератор горизонтального типу ПГВ-1000М (далі ПГ) є складовою частиною циркуляційного контуру АЕС з водо-водяним енергетичним реактором ВВЕР-1000 та призначений для вироблення насиченої пари у складі енергоблоку АЕС (рисунок 1) [13].



1 – головний центральний насос; 2 – підвід води; 3 – холодний колектор; 4 – жалюзійний сепаратор; 5 – корпус; 6 – трубний пучок; 7 – занурювальний лист; 8 – гарячий колектор; 9 – реактор

Рисунок 1 – Парогенератор ПГВ-1000М [13]

Нині на АЕС України експлуатуються 52 горизонтальні ПГ, напрацювання яких становить від 10 до 130 тис. годин [14]. Корпус ПГ у середній частині зварений з двома вертикальними колекторами першого контуру, призначеними для з'єднання з 11 000 теплообмінних труб (ТОТ), зігнутих в U-подібні змійовики [13]. Трубний пучок з елементами дистанціювання і кріплення займає близько 78 % площі частини поперечного перерізу корпусу парогенератора. ТОТ в пучках розміщені в шаховому порядку з кроками 19 мм по висоті і 23 мм по ширині [15], а мінімальна відстань між зовнішніми стінками ТОТ становить 6 мм (рисунок 2). Колектор парогенератора виготовлений зі сталі 10ГН2МФА. Внутрішня поверхня колекторів плакована антикорозійним аустенітним наплавленням (1-й шар – ЗІО-8, 2-й шар – ЭА 898/21Б), товщина кожного шару становить близько 3 мм.

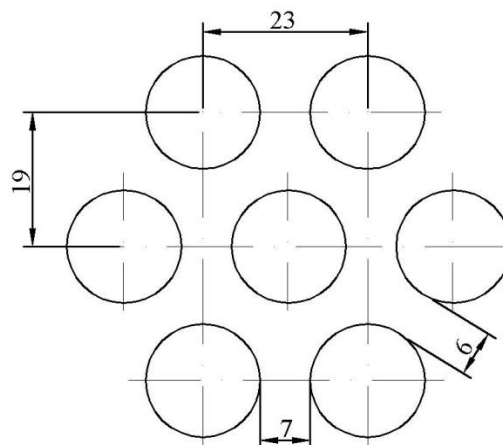


Рисунок 2 – Схема розташування теплообмінних труб у ПГ

Кінці змійовиків на ПГ, виготовлених до 1990 року, закладалися в отвори колектору з подальшим вальцюванням на всю глибину закладення методом вибуху [15]. Кінці змійовиків на ПГ, виготовлених з 1990 року, вальцювалися після закладення в отворах колектору методом гідророздачі і механічного довальцювання вихідної ділянки. Торці змійовиків в обох варіантах були зварені з антикорозійним наплавленням колектору аргонодуговим способом.

В процесі експлуатації ПГ виявлялись різні випадки їх руйнування [13-16]. Однією з найважливіших умов безпечної експлуатації енергоблоків з реакторами типу ВВЕР є відсутність протікання теплоносія з 1-го контуру в 2-й [16]. Теплообмінні трубки забезпечують передачу тепла від теплоносія першого контуру до другого контуру і є захисним бар'єром між ними. Пошкодження ТОТ може призвести до потраплення радіоактивного теплоносія першого контуру в другий, що порушує безпеку ядерних енергоблоків.

Механізми пошкодження ТОТ ПГ детально описані в документі ІАЕА [17]. Показано, що головною причиною пошкоджень ТОТ є загальна корозія, піттинги, корозійне розтріскування під напруженням та поєднання піттингів і корозійного розтріскування. В більшості випадків деградація починається з точкової корозії. Через деякий час, при одночасному збільшенні напружень, що розтягують труби у радіальному напрямку, на цю частину труби додатково починає впливати корозійне розтріскування. Саме зародження та інтенсивне зростання дефектів розтріскування в умовах нормальної експлуатації може призво-

дити до течій з першого контуру в другий. При виникненні такої ситуації блок зупиняють на позаплановий ремонт. Дефектні ТОТ герметизують встановленням заглушки (рисунки 3), яка обварюється аргонодуговим способом. Збільшення заглушених ТОТ призводить як до значних фінансових втрат, так і до зниження ефективності експлуатації блоків через зменшення поверхні теплообміну.

Згідно зі схемою ремонту (рисунки 3) стикове кільцеве зварне з'єднання заглушки з корпусом колектору ПГ повинно бути виконано у вертикальному просторовому положенні з неповним проваром (мінімальна глибина провару – від 1,5 мм) та локалізованою зоною плавлення.

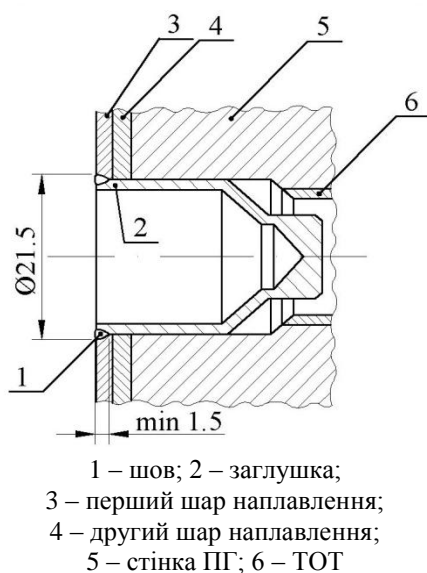


Рисунок 3 – Схема вварювання заглушки

Аргонодугове зварювання [18-20], що нині використовується при ремонті, характеризується підвищеним тепловкладенням у зварювані деталі й недостатньою концентрацією теплового джерела порівняно з лазерним зварюванням [21-23]. Коефіцієнт форми шва K_f (відношення ширини шва до глибини провару) при аргонодуговому зварюванні становить 2...4. При виконанні умови забезпечення мінімальної глибини провару не менше 1,5 мм це призводить до збільшення діаметра кільцевого зварного з'єднання з заглушкою (рисунки 4) [24]. В результаті цього відбувається перегрів деталей і негативний вплив на сусідні з'єднання, пов'язаний зі зростанням залишкових напружень. Область впливу приблизно збігається з зоною кольорів мінливості (див. рисунки 4). Все це обмежує можливості за-

стосування аргонодугового зварювання для ремонту ПГ типу ПГВ-1000М.



Рисунок 4 – Заглушка встановлена із застосуванням аргонодугового зварювання [24]

Актуальність роботи полягає в перспективі заміни технології аргонодугового зварювання. Нова технологія повинна забезпечити виконання вимоги досягнення необхідної глибини провару при зменшенні діаметра зварного з'єднання. Цього можливо досягнути при застосуванні локальних джерел нагріву, таких як лазерний або електронний промінь. Ідея авторів полягає у застосуванні для ремонту ПГ технології лазерного зварювання. Саме лазерний промінь як висококонцентроване джерело енергії може забезпечити вкрай малий локальний термічний вплив на конструкцію та більший експлуатаційний ресурс зварних з'єднань.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомі лазерні методи зварювання також не позбавлені недоліків. Вплив лазерного випромінювання на метал при зварюванні характеризується жорстким термічним циклом, що викликає небажані зміни в структурі матеріалу, появу напруженого стану і появу деформацій [25-27]. Все це призводить до виникнення дефектів (пор, тріщин), які значно погіршують механічні властивості, а отже, знижується надійність і довговічність. У зв'язку з цим виникає необхідність дослідити вплив параметрів лазерного зварювання на структуру та міцність зварних з'єднань.

Невирішеною залишається задача визначення технологічних особливостей лазерного зварювання з'єднань з різнорідних нержавіючих аустенітних сталей у вертикальному просторовому положенні.

Очікується, що при варіюванні температурно-часовими параметрами процесу лазер-

ного зварювання загнуток з нержавіючої сталі буде отримана дрібнозерниста структура шва, яка забезпечить близькі з основним металом (нержавіюча сталь іншого хімічного складу) характеристики по корозійній стійкості, міцності і пластичності.

Мета роботи – визначення технологічних особливостей лазерного зварювання з'єднань з різнорідних нержавіючих аустенітних сталей у вертикальному просторовому положенні.

Методи та об'єкти дослідження. Об'єктом досліджень виступав процес лазерного зварювання стикових з'єднань з різнорідних нержавіючих аустенітних сталей у вертикальному просторовому положенні.

Предметом дослідження були параметри технологічних режимів лазерного зварювання стикових з'єднань з нержавіючих аустенітних сталей у вертикальному просторовому положенні та їх вплив на структуру, якість та механічні характеристики зварних з'єднань.

Матеріали та методики дослідження. Матеріалами дослідження (таблиця 1) слугували нержавіючі аустенітні сталі 10X18H10T (з якої виготовляють заглушки) та 10X17H13M3T (наближена за своїм хімічним складом до першого шару наплавлення у ПГ).

Таблиця 1 – Хімічний склад сталей, що зварюються

Хімічний елемент	Склад, мас. %	
	10X18H10T	10X17H13M3T
C	< 0,1	< 0,1
Si	< 0,8	< 0,8
Mn	1...2	< 2
Ni	10...11	12...14
S	< 0,2	< 0,2
P	< 0,035	< 0,035
Cr	17-19	16-18
Ti	< 0,6	< 0,7
Fe	Решта	Решта

Для вирішення задачі одержання стикового з'єднання з неповним проваром авторами було запропоновано дослідити технологічні особливості процесу лазерного зварювання на режимах «кинджального» і «теплопровіднісного» проплавлення (рисунок 5). Відповідно, режим «кинджального проплавлення» забезпечував одержання зварних з'єднань з коефіцієнтом форми шва $K_{\phi} < 1$, але потребував

більш ретельної механічної підгонки крайок деталей, що зварюються. Зварювання у режимі «теплопровіднісного» проплавлення дає змогу одержати зварне з'єднання з коефіцієнтом форми шва $K_{\phi} \geq 1$, що характерний для аргонодугового зварювання. При цьому об'єм переплавленого металу більший, що дозволяє не підвищувати вимоги до підгонки крайок перед зварюванням.

Для визначення технологічних особливостей лазерного зварювання зварних з'єднань з різнорідних нержавіючих аустенітних сталей у вертикальному просторовому положенні роботи виконували за наступною методикою:

1. З механічно підготовлених заготовок розміром 300×100 мм з листів товщиною по 3,0 мм зі сталей 10X18H10T (з границею міцності $\sigma_B = 520...550$ МПа) та 10X17H13M3T (з границею міцності $\sigma_B = 510...540$ МПа) зварювали такі контрольні стикові з'єднання у вертикальному просторовому положенні з неповним проваром по товщині: прямолінійне стикове з коефіцієнтом форми шва $K_{\phi} < 1$ (рисунок 5, а); прямолінійне стикове з коефіцієнтом форми шва $K_{\phi} \geq 1$ (рисунок 5, б).

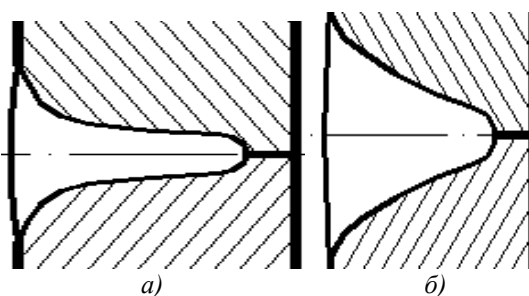


Рисунок 5 – Схематичне зображення стикових зварних з'єднань з коефіцієнтами форми шва $K_{\phi} < 1$ (а) та $K_{\phi} \geq 1$ (б)

2. Для кожного з одержаних стикових зварних з'єднань з різнорідних сталей виконували візуальний та радіографічний контроль, металографічні дослідження та визначали їх мікротвердість.

3. На підставі аналізу результатів досліджень визначали параметри технологічних режимів зварювання кільцевих зварних з'єднань з різнорідних сталей.

4. Зразки типу «пластина-труба» (рисунок 6), готували з заготовок із листової сталі 10X17H13M3T (товщиною 3 мм) розміром 100×100 мм з отвором діаметром 20 мм, які зварювали кільцевим швом із трубними заго-

товками довжиною 100 мм зі сталі 10X18H10T (із зовнішнім діаметром труби 20 мм і товщиною стінки 1,5 мм), при горизонтальному розташуванні труби, в результаті варіювання параметрів технологічних режимів одержували кільцеві стикові зварні з'єднання з неповним проваром труби з листом з коефіцієнтом форми шва $K_{\phi} < 1$ та $K_{\phi} \geq 1$.

5. Кожне з одержаних кільцевих зварних з'єднань типу «пластина-труба» тестували за п. 2.



Рисунок 6 – Фотографія з'єднання типу «пластина-труба» після лазерного зварювання

6. На підставі аналізу результатів досліджень визначали найбільш доцільні параметри технологічних режимів зварювання кільцевих зварних з'єднань з різнорідних сталей для вварювання заглушок у теплообмінні трубки парогенераторів.

Роботи з визначення технологічних особливостей одержання кільцевих зварних з'єднань з нержавіючих сталей у вертикальному просторовому положенні виконували на лабораторному стенді (рисунок 7), з використанням Nd:YAG-лазера «DY044» виробництва фірми «ROFIN-SINAR» (Німеччина) з довжиною хвилі випромінювання 1,06 мкм.

Результати експериментальних досліджень. Параметри технологічних режимів лазерного зварювання контрольних прямолінійних стикових з'єднань з листових зразків, виконаних у вертикальному просторовому положенні, змінювали у таких діапазонах: швидкість зварювання – 17...100 мм/с; величина розфокусування – -1...+7 мм; потужність лазерного випромінювання – 1,65...4,4 кВт. У дослідженнях використовували лінзу з фокусною відстанню 300 мм та аргон як захисний газ з витратами 333 см³/с.

Для одержаних прямолінійних контрольних стикових з'єднань з листових зразків застосовували критерії оцінки якості, що задовольняють вимогам стандарту ДСТУ EN ISO

13919-1:2015 «Зварювання. З'єднання, виконані електронно-променевим та лазерним зварюванням. Настанова щодо оцінювання рівня якості залежно від дефектів. Частина 1. Сталь».



а)



б)

а) фото стенду;
б) з'єднання типу «пластина-труба» при зварюванні

Рисунок 7 – Лабораторний стенд для вивчення технологічних особливостей лазерного зварювання стикових прямолінійних та кільцевих зварних з'єднань у вертикальному положенні

Встановлено, що характерними дефектами, які утворюються при лазерному зварюванні прямолінійних контрольних стикових з'єднань листових зразків з нержавіючих сталей у вертикальному просторовому положенні, можуть бути подрізи, несплавлення, усадоч-

ні раковини та раковини у кратері, перевищення випуклості, поодинокі пори та порожнини або їхні ланцюжки (рисунок 8).



Рисунок 8 – Рентгенограма кільцевого стикового зварного з'єднання з дефектами у вигляді ланцюжків пор та порожнин

За результатами аналізу даних металографічних досліджень, візуального та радіографічного контролю контрольних стикових з'єднань листових зразків були обрані діапазони параметрів технологічних режимів лазерного зварювання, які давали можливість одержувати стикові зварні з'єднання категорії якості не нижче «С» згідно з ДСТУ EN ISO 13919-1:2015.

На цих режимах були виготовлені зварні з'єднання за запропонованими вище технологічними варіантами вварювання заглушок: кільцеві стикові з'єднання у вертикальному положенні з коефіцієнтом форми шва $K_{\phi} < 1$ та $K_{\phi} \geq 1$ з неповним проваром.

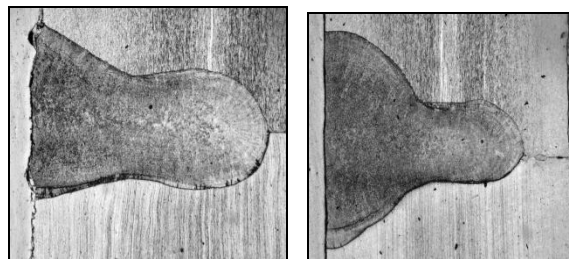
У ході проведення механічних випробувань на статичний одноосовий розтяг отримано наступні значення зміни зусилля руйнування при статичному розтягу кільцевих стикових зварних з'єднань типу «пластина-труба» зі сталей 10X18H10T (труба) і 10X17H13M3T (пластина):

- для зразків з коефіцієнтом форми шва $K_{\phi} \geq 1$ границя міцності $\sigma_B = 510...530$ МПа;
- для зразків з коефіцієнтом форми шва $K_{\phi} < 1$ границя міцності $\sigma_B = 460...475$ МПа.

На рисунку 9, а, зображено макрошліф, характерний для кільцевих стикових зварних з'єднань типу «пластина-труба» зі сталей 10X18H10T і 10X17H13M3T (товщиною по 3 мм), зварених з неповним проваром у вертикальному просторовому положенні, з коефіцієнтом форми шва $K_{\phi} < 1$ (згідно з варіантом № 1 вварювання заглушки).

Структура металу шва зварного з'єднання, зображеного на рисунку 9, а, дис-

персна літа та розділена на дві зони. В центральній частині шва по всій висоті спостерігається комірчасто-дендритна структура. В середній частині шва ближче до лінії сплавлення – зона тонких стовпчастих кристалітів, що ростуть у напрямку відводу тепла.



а) з'єднання з $K_{\phi} < 1$; б) з'єднання з $K_{\phi} \geq 1$

Рисунок 9 – Фото макрошліфів ($\times 50$) зварних з'єднань зі сталей 10X18H10T і 10X17H13M3T

Зони розділені лінією більш дрібних кристалітів (рисунок 9). Мікроструктура в центральній частині шва являє собою аустенітну матрицю з невеликою кількістю δ -фериту (1,5...1,7%). Розмір комірок становить в основному 12...13 мкм. Твердість металу шва у центральній частині становить HV1 2950...3090 МПа. Є ділянки, де твердість підвищується до HV1 3200...3380 МПа. У нижній частині шва твердість досягає значень HV1 3320...3650 МПа. На лінії сплавлення мікроструктура також складається з аустеніту і δ -фериту, але структура дрібніша, ніж у центрі шва. Ширина кристалітів становить 2...9 мкм. Твердість металу на лінії сплавлення становить HV1 2990...3030 МПа, є окремі ділянки, де твердість підвищується до HV1 3160 МПа. У металі шва спостерігаються нітриди (у значній кількості). Зона термічного впливу (ЗТВ) не виражена, її структура складається з аустеніту і δ -фериту. Бал зерна в ЗТВ зварного з'єднання – № 6. Твердість ЗТВ становить HV1 2650...2840 МПа. У ЗТВ спостерігаються нітриди.

На рисунку 9, б зображено макрошліф, характерний для стикових зварних з'єднань зі сталі 10X18H10T (товщиною по 3 мм), зварених з неповним проваром у вертикальному просторовому положенні, з коефіцієнтом форми шва $K_{\phi} \geq 1$ (згідно з варіантом № 2 вварювання заглушки). У цьому зварному з'єднанні структура металу шва також дисперсна літа з аналогічним поділом на дві характерні зони: комірчасто-дендритну в центрі і тонких стов-

частих кристалітів в середині. Кількість δ -фериту зростає до 1,7...1,9 %. Розмір комірок змінюється до 13...17 мкм. Твердість металу шва цього зварного з'єднання у центральній частині становить HV1 2730...2870 МПа, є ділянки, де твердість підвищується до HV1 2920...3090 МПа, а в нижній частині шва твердість підвищується до HV1 3140...3320 МПа. Ширина кристалітів на лінії сплавлення становить 4...9 мкм. Твердість металу на лінії сплавлення знижується до HV1 2880...2990 МПа, але є окремі ділянки з підвищеною (до HV1 3040 МПа) твердістю. У металі шва спостерігаються нітриди (в значній кількості). Зона термічного впливу виражена слабо. Бал зерна у ЗТВ зварного з'єднання – № 7, а твердість – HV1 2600...2780 МПа.

За результатами механічних випробувань на статичний розтяг встановлено, що для кільцевих стикових зварних з'єднань типу «пластина-труба» з коефіцієнтом форми шва $K_{\phi} \geq 1$ зусилля руйнування приблизно на 11 % вище порівняно зі з'єднаннями з коефіцієнтом форми шва $K_{\phi} < 1$.

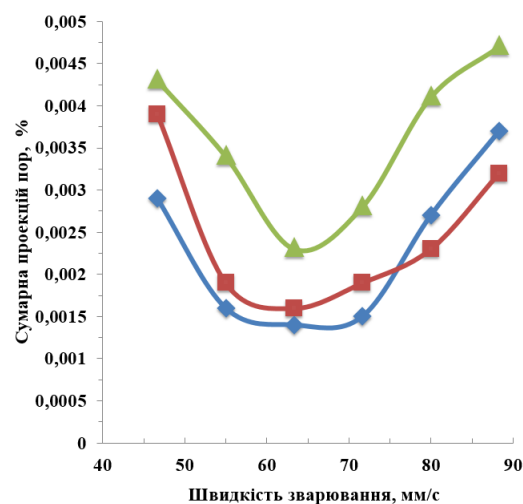
Порівняння даних показує, що зусилля руйнування для кільцевих стикових зварних з'єднань типу «пластина-труба» зі сталей 10X18N10T (труба) і 10X17N13M3T (пластина) становить не менше 80 % зусилля руйнування основного матеріалу труби (сталі 10X18N10T).

Обговорення результатів. З метою визначення впливу параметрів лазерного зварювання на характеристики одержаних з'єднань проведено аналіз результатів візуального та радіографічного контролю, металографічних досліджень, випробувань на статичний розтяг. Було одержано графічні залежності характеристик одержаних з'єднань від найбільш впливових факторів (параметрів технологічних режимів).

Встановлено, що при виконанні вварювання заглушки за технологічним варіантом № 1 ($K_{\phi} < 1$, див. рисунок 5, а) при збільшенні швидкості зварювання з 47 мм/с до 63...72 мм/с сумарна проекція пор (загальна площа пор, виявлена при радіографічному контролі) зменшується з 0,45 % (від загальної площі зварного з'єднання) до 0,14 % (рисунок 10).

Найменше значення сумарної кількості проекцій пор (0,14 %) зафіксовано при розфокусуванні –1 мм, що майже в 1,5 разу менше

порівняно зі зварюванням з аналогічними параметрами по швидкості та потужності лазерного випромінювання, але з величиною розфокусування +2 мм (рисунок 10).



розфокусування, мм: ▲ – +2; ■ – 0; ◇ – –1;
потужність P=4,4 кВт

Рисунок 10 – Сумарна площа проекцій пор залежно від швидкості та величини розфокусування лазерного зварювання за технологічним варіантом № 1 ($K_{\phi} < 1$)

Окрім того, спостерігається більша стабільність у формуванні незначного підсилення (0,7...0,4 мм) верхнього валика шва зварного з'єднання при збільшенні швидкості лазерного зварювання з 47 мм/с до 88 мм/с, відповідно (рисунок 11).

При виконанні вварювання заглушки за технологічним варіантом № 2 ($K_{\phi} \geq 1$, див. рисунок 5, б), спостерігається зменшення сумарної проекції пор з 0,5 % до 0,09 % при збільшенні швидкості зварювання з 7,0 мм/с до 13...16 мм/с (рисунок 11).

Розфокусування на –1 мм відносно поверхні деталей, що зварюються, призводить до суттєвого зниження сумарної проекції пор (рисунок 12).

Порівняно зі зварюванням з аналогічними параметрами по швидкості та потужності лазерного випромінювання, але з величиною розфокусування +1 мм, одержані значення майже в 2,5 разу менші (рисунок 12).

Також розфокусування на –1 мм сприяє одержанню стабільного формування верхнього валика з підсиленням шва зварного з'єднання (0,7...0,2 мм) при збільшенні швидкості лазерного зварювання з 7 мм/с до 23 мм/с, відповідно (рисунок 13).

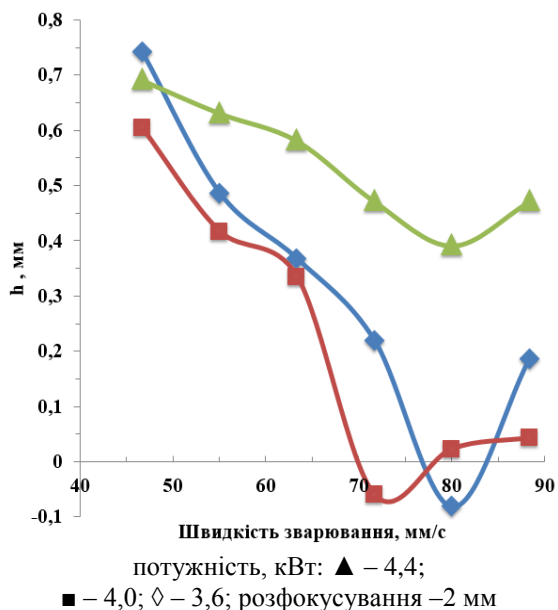


Рисунок 11 – Підсилення верхнього валика шва зварного з'єднання залежно від швидкості лазерного зварювання за технологічним варіантом № 1 ($K_{\phi} < 1$)

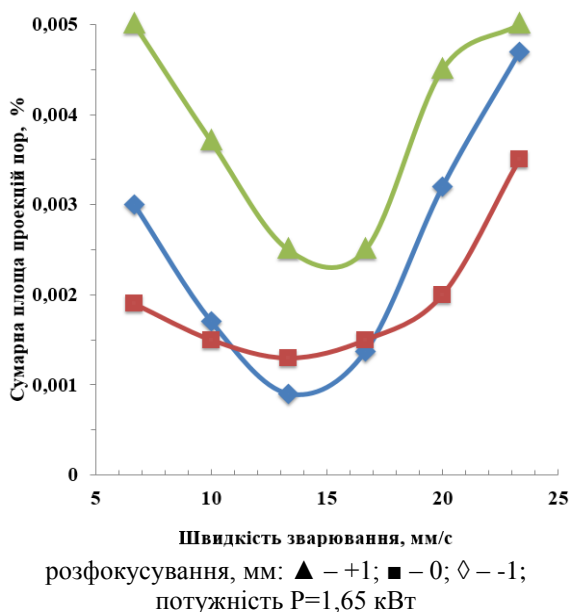


Рисунок 12 – Сумарна площа проекцій пор залежно від швидкості лазерного зварювання за технологічним варіантом № 2 ($K_{\phi} \geq 1$)

Було виявлено всі види дефектів отриманих з'єднань. Розроблені й перевірені на практиці засоби усунення цих дефектів та їх запобігання наведено у таблиці 2.

Проведений комплексний аналіз результатів досліджень та випробувань дав змогу визначити для кожного з технологічних варіантів вварювання заглишок режими зва-

рювання. Критерієм відбору доцільних параметрів режимів лазерного зварювання кільцевих стикових зварних з'єднань служили умови відповідності вимогам категорії якості «високий В» стандарту ДСТУ EN ISO 13919-1:2015.

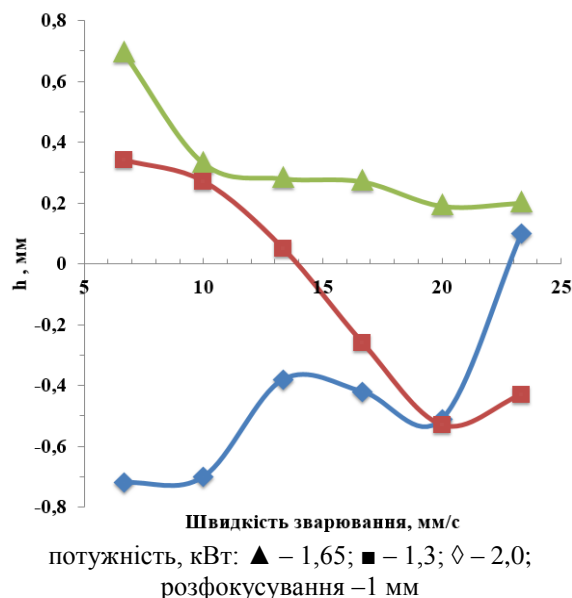


Рисунок 13 – Підсилення верхнього валика шва зварного з'єднання залежно від швидкості лазерного зварювання за технологічним варіантом № 2 ($K_{\phi} \geq 1$)

Таблиця 2 – Засоби усунення дефектів або їх запобігання

Дефекти	Усунення / запобігання
пори, ланцюжки пор, несплавлення, заниження шва, непровари	переварювання шва з додаванням присадкового матеріалу (за необхідністю) / -
усадочні раковини та раковини в кратері	- / програмне управління плавним наростанням і спаданням потужності лазерного променя на початку та в кінці шва
підрізи, перевищення випуклості	- / додаткове переплавлення розфокусованим променем
збільшення площі перерізу зварного з'єднання	- / розширення зони дії лазерного променя подільником лінзового об'єктива

Лазерне зварювання кільцевих стикових зварних з'єднань має наступні технологічні особливості:

1. Наявна ділянка наростання потужності лазерного випромінювання на початку зварювання та ділянка спадання в кінці для запобігання утворенню усадочних раковин та раковин у кратері.

2. Параметри технологічних режимів (потужність лазерного випромінювання; час та швидкість зварювання; розташування фокусу лінзи тощо) для ділянки наростання потужності лазерного випромінювання на початку зварювання та ділянки спадання в кінці повинні бути визначені емпірично для кожного варіанта.

3. Ділянки швів на початку та у кінці зварювання, які не відповідають умовам досягнення необхідної глибини 1,5 мм, потребують повторного переварювання для забезпечення заданої глибини провару.

4. На відміну від дугового зварювання, немає необхідності коригувати параметри (потужність лазерного випромінювання; час та швидкість зварювання) залежно від проходження ділянки умовного годинника, тому що після проходження ділянки з одночасним наростанням потужності лазерного випромінювання та швидкості зварювання процес стабілізується і на всіх ділянках зварювання умовного годинника («на спуск» з 12 до 6-ї години та напрямком за годинниковою стрілкою; «на підйом» з 6 до 12-ї години та напрямком за годинниковою стрілкою тощо) можливе досягнення заданої глибини провару.

5. Напрямок руху при зварюванні за годинниковою стрілкою умовного годинника чи проти неї не має значного впливу на структуру та характеристики зварного з'єднання при досягненні заданої глибини.

6. Місце початку зварювання впливає на розміри ділянки шва, на якій процес зварювання стабілізується та досягається задана глибина провару.

7. Для одержання рівня якості «В високий» рекомендується для зварних з'єднань з коефіцієнтом форми шва $K_f < 1$ місцем початку руху обирати «9 годин» умовного годинника, а напрямком руху – за годинниковою стрілкою.

8. Для одержання рівня якості «В високий» рекомендується для зварних з'єднань з коефіцієнтом форми шва $K_f \geq 1$ місцем початку руху обирати «3 години» умовного годинника, а напрямком руху – за годинниковою стрілкою.

Емпіричним шляхом визначено параметри зварювання, необхідні для одержання кільцевих стикових з'єднань зі сталей 10X18H10T

та 10X17H13M3T у вертикальному положенні з коефіцієнтом форми шва $K_f < 1$ з неповним проваром, що відповідають вимогам категорії якості «високий В» стандарту ДСТУ EN ISO 13919-1:2015.

Технологічні рекомендації з лазерного зварювання заглушок. На основі результатів досліджень, розроблених технологічних прийомів та визначених параметрів процесу зварювання сформульовано технологічні рекомендації з лазерного зварювання заглушок у теплообмінні трубки колектору парогенератора типу ПГВ-1000М при його ремонті.

Лазерне зварювання запропоновано виконувати з наступними технологічними параметрами (за режимом № 1331.2): потужність лазерного випромінювання – 4,4 кВт; швидкість зварювання – 63,3 мм/с; величина розфокусування – 1 мм; витрати захисного газу (аргон) – 333 см³/с; початок руху – з «9 годин» умовного годинника; напрямком руху – за годинниковою стрілкою. Під час виконання зварювання за режимом № 1331.2 механізм переміщення здійснює два повні оберти за годинниковою стрілкою, а потужність лазерного випромінювання змінюється програмою за циклом, зображеним на рисунку 14. Завдяки цьому забезпечуються етапи зростання глибини провару, її стабілізації та зменшення, а також відсутність дефектів у вигляді кратерів (рисунок 15).

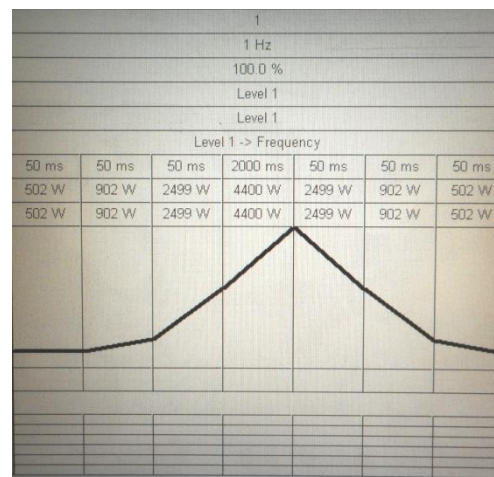


Рисунок 14 – Циклограма програми управління потужністю лазерного випромінювання при зварюванні за режимом № 1331.2

Для одержання кільцевих стикових з'єднань зі сталей 10X18H10T та 10X17H13M3T у вертикальному положенні з коефіцієнтом форми шва $K_f \geq 1$ з неповним

проваром, що відповідають вимогам категорії якості «високий В» стандарту ДСТУ EN ISO 13919-1:2015, лазерне зварювання запропоновано виконувати з наступними параметрами технологічних режимів: за режимом № 1330.1 потужність лазерного випромінювання – 1,65 кВт; швидкість зварювання – 13,3 мм/с; заглиблення фокусу на 1 мм; витрати захисного газу (аргон) – 333 см³/с; початок руху – з «3 годин» умовного годинника; напрямку руху – за годинниковою стрілкою.



Рисунок 15 – Зварне з'єднання, одержане на режимі № 1331.2

Під час виконання зварювання за вищевказаним режимом № 1330.1 механізм переміщення також здійснює два повні оберти за годинниковою стрілкою, а потужність лазерного випромінювання змінюється програмою за циклом, зображеним на рисунку 16. З'єднання, зварене на зазначеному режимі, зображено на рисунку 17.

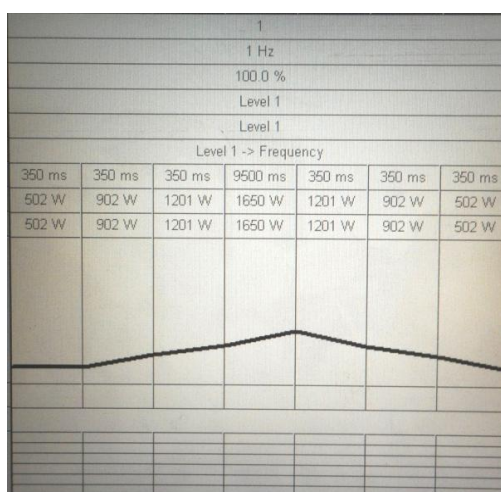


Рисунок 16 – Циклограма програми управління потужністю лазерного випромінювання при зварюванні за режимом № 1330.1



Рисунок 17 – Зварне з'єднання, одержане за режимом № 1330.1

Висновки:

1. Лазерне зварювання є перспективною технологією для заміни аргонодугового зварювання при ремонті теплообмінників парогенераторів на атомних і теплових електростанціях, про що свідчать результати проведених досліджень. Воно забезпечує вкрай локальний термічний вплив та підвищує експлуатаційний ресурс зварних з'єднань.

2. Для запропонованих зварних з'єднань заглушок з коефіцієнтами форми шва $K_{\phi} < 1$ та $K_{\phi} \geq 1$ можна вибрати технологічні параметри, для яких результати механічних випробувань, візуального та радіографічного контролю, випробувань на непроникність та металографічних досліджень свідчать про відповідність вимогам рівня якості «високий В» згідно зі стандартом ДСТУ EN ISO 13919-1:2015.

3. Аналіз основних причин виникнення дефектів при лазерному зварюванні кільцевих зварних з'єднань з різномірних нержавіючих сталей дав можливість запропонувати і перевірити на практиці заходи усунення цих дефектів та запобігання їх утворенню.

4. Технологічні рекомендації з лазерного зварювання заглушок у теплообмінні трубки при ремонті колектору парогенератора типу ПТВ-1000М можливо застосовувати також при ремонті інших енергетичних об'єктів.

Список літератури

- [1] B. Ge, and J. Zhang, "Modeling of main steam and two-phase heat exchanger for nuclear power unit," in *IEEE 2nd Int. Conf. Computing, Control and Industrial Engineering*, Wuhan, 2011, pp. 337-340. doi: 10.1109/CCIENG.2011.6008027
- [2] Державне підприємство «Національна атомна енергогенеруюча компанія «Енер-

- гоатом», «Стратегічний план розвитку державного підприємства «Національна атомна енергогенеруюча компанія «Енергоатом» на 2018-2022 роки», *Державне підприємство «Національна атомна енергогенеруюча компанія «Енергоатом»*, 2018. [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://www.energoatom.com.ua/files/file/strateg_chniy_plan_2018_2022_04042018.pdf. Дата звернення: Листоп. 19, 2019.
- [3] H. Bastida, C. E. Ugalde-Loo, M. Abeysekera, X. Xu, and M. Qadrdan, "Dynamic modelling and control of counter-flow heat exchangers for heating and cooling systems", in *54th Int. Universities Power Engineering Conf. (UPEC)*, Bucharest, Romania, 2019, pp. 1-6.
doi: 10.1109/UPEC.2019.8893634
- [4] J. Xu, R. Z. Wang, and Y. Li, "A review of available technologies for seasonal thermal energy storage", *Solar Energy*, vol. 103, pp. 610-638, 2013.
- [5] L. Qoaider, Q. Thabit, and S. Kiwan, "Performance assessment of a moving-bed heat exchanger with a sensible heat transfer medium for solar central receiver power plants", in *8th Int. Renewable Energy Congress (IREC)*, Amman, 2017, pp. 1-5.
doi: 10.1109/IREC.2017.7926051
- [6] T. Baumann, S. Zunft, and R. Tamme, "Moving bed heat exchangers for use with heat storage in concentrating solar plants: a multiphase model", *Heat Transfer Engineering*, vol. 35, pp. 224-231, 2013.
- [7] F. Middleton, "An all metal UHV flange seal for dissimilar materials", *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 28, no. 3, pp. 3298-3299, June 1981.
doi: 10.1109/TNS.1981.4332084
- [8] Q. Yin, and Y. Li, "Straight wave UT technical for dissimilar metal weld of nozzle to safe-end in reactor pressure vessel", in *IEEE Far East Forum on Nondestructive Evaluation/Testing*, Chengdu, 2014, pp. 122-127.
doi: 10.1109/FENDT.2014.6928246
- [9] H. Chen, Z. Yu, W. Wang, G. Ma, and M. Hong, "Research on ultrasonic inspection of control rod drive mechanism housing weld in Chinese evolutionary pressurized reactor nuclear power plant," in *IEEE Far East Forum on Nondestructive Evaluation/Testing*, Chengdu, 2014, pp. 128-134.
doi: 10.1109/FENDT.2014.6928247
- [10] L. V. Petrushynets, I. V. Falchenko, A. I. Ustinov, O. O. Novomlynets, and S. M. Yushchenko, "Vacuum diffusion welding of intermetallic alloy γ -TiAl with high-temperature alloy EI437B through nanolayered interlayers", in *IEEE 2nd Ukr. Conf. Electr. and Comp. Engineering (UKRCON)*, Lviv, Ukraine, 2019, pp. 542-546.
doi: 10.1109/UKRCON.2019.8879918
- [11] J. Thamprajamjit, and P. Surin, "Dissimilar metal joining between stainless steel SUS304 and carbon steel SS400 using plasma arc welding process", in *2nd Int. Conf. Engineering Innovation (ICEI)*, Bangkok, 2018, pp. 42-45.
doi: 10.1109/ICEI18.2018.8448663
- [12] M. Cavallini, P. Veronesi, L. Lusvarghi, E. Colombini, R. Giovanardi, and L. Rigon, "Optimization of laser welding of dissimilar corrosion resistant alloys", in *IEEE 3rd Int. Forum on Research and Technologies for Society and Industry (RTSI)*, Modena, 2017, pp. 1-5.
doi: 10.1109/RTSI.2017.8065935
- [13] Парогенератор ПГВ-1000М. Описание и основные характеристики. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://desnogorskspektr.ru/aes/teoriya-aes/parogenerator-pgv-1000m-opisanie-i-osnovnye-harakteristiki.html>. Дата обращения: Нояб. 19, 2019.
- [14] О. П. Шугайло, "Напружено-деформований стан трубчатих елементів парогенераторів при аварійних ситуаціях", дис. канд. техн. наук, НАН України, Ін-т механіки ім. С. П. Тимошенка. Київ, 2019.
- [15] Т. Х. Маргулова, *Атомные электрические станции*. Москва: Высшая школа, 1984.
- [16] М. Н. Заразовский, М. В. Бородий, и В. Я. Козлов, "Риск-ориентированный подход к прогнозированию целостности и оптимизации контроля теплообменного оборудования с большой статистикой дефектов", *Ядерна та радіаційна безпека*, № 4, с. 32-38, 2016.
- [17] IAEA-TECDOC-1577. Strategy for Assessment of WWER Steam Generator Tube Integrity, Vienna: IAEA, 2007.
- [18] V. V. Müller, and V. N. Mitroshin, "Automatic system of shape weld stabilization with manual and mechanized argon-arc welding by non-consumable electrode", in

- Int. Rus. Automation Conf. (RusAutoCon)*, Sochi, 2018, pp. 1-5.
doi: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501708
- [19] M. Bodeau, "Mitigating potential hazards of TIG welding on spacecraft", in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 61, no. 1, pp. 90-99, Feb. 2019.
doi: 10.1109/TEMPC.2018.2813331
- [20] A. R. Kohandehghan, S. Serajzadeh, and A. H. Kokabi, "A study on residual stresses in gas tungsten arc welding of AA5251", *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 25, pp. 1242-1250, 2010.
- [21] L. Markashova, O. Berdnikova, A. Bernatskyi, M. Iurzenko, and V. Sydorets, "Physical and mechanical properties of high-strength steel joints produced by laser welding", *IEEE Int. Young Scientists Forum on Appl. Physics and Engineering (YSF)*, Lviv, 2017, pp. 88-91.
doi: 10.1109/YSF.2017.8126596
- [22] S. Katayama, *Handbook of laser welding technologies*. Cambridge, Woodhead Publishing Ltd., 2013.
- [23] A. Kurc-Lisiecka, A. Lisiecki, "Laser welding of the new grade of advanced high-strength steel DOMEX 960", *Materiali in tehnologije / Materials and technology*, vol. 51, no. 7, pp. 199-204, 2017.
- [24] Technologies for non-destructive testing and repair of NPP components NUSIM 2008 VUJE. [Online]. Available: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/43/124/43124116.pdf
- [25] L. Markashova, O. Berdnikova, A. Bernatskyi, V. Sydorets, and O. Bushma, "Crack resistance of 14KhGN2MDAFB high-strength steel joints manufactured by laser welding", *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, vol. 224, iss. 1, p. 012013, 2019.
doi:10.1088/1755-1315/224/1/012013
- [26] H. Vemanaboina, S. Akella, R. K. Buddu, and E. Gundabattini, "Distortion validation of laser beam welded SS316LN steel plates", *8th Int. Conf. Modeling Simulation and Appl. Optimization (ICMSAO)*, Manama, Bahrain, 2019, pp. 1-5.
doi: 10.1109/ICMSAO.2019.8880444
- [27] H. Murakawa, "Residual stress and distortion in laser welding", in *Handbook of Laser Welding Technologies*, Cambridge, Woodhead Publishing Ltd., 2013, pp. 374-400.
- ## References
- [1] B. Ge, and J. Zhang, "Modeling of main steam and two-phase heat exchanger for nuclear power unit," in *IEEE 2nd Int. Conf. Computing, Control and Industrial Engineering*, Wuhan, 2011, pp. 337-340.
doi: 10.1109/CCIENG.2011.6008027
- [2] State enterprise "National atomic energy generating company "Energoatom", "Strategic development plan of the state enterprise "National atomic energy generating company "Energoatom" for 2018-2022," *State enterprise "National atomic energy generating company "Energoatom"*, 2018. [Online]. Available: http://www.energoatom.com.ua/files/file/strateg_chniy_plan_2018_2022_04042018.pdf. Accessed on: Nov. 19, 2019.
- [3] H. Bastida, C. E. Ugalde-Loo, M. Abeysekera, X. Xu, and M. Qadrdan, "Dynamic modelling and control of counter-flow heat exchangers for heating and cooling systems", in *54th Int. Universities Power Engineering Conf. (UPEC)*, Bucharest, Romania, 2019, pp. 1-6.
doi: 10.1109/UPEC.2019.8893634
- [4] J. Xu, R. Z. Wang, and Y. Li, "A review of available technologies for seasonal thermal energy storage", *Solar Energy*, vol. 103, pp. 610-638, 2013.
- [5] L. Qoaider, Q. Thabit, and S. Kiwan, "Performance assessment of a moving-bed heat exchanger with a sensible heat transfer medium for solar central receiver power plants", in *8th Int. Renewable Energy Congress (IREC)*, Amman, 2017, pp. 1-5.
doi: 10.1109/IREC.2017.7926051
- [6] T. Baumann, S. Zunft, and R. Tamme, "Moving bed heat exchangers for use with heat storage in concentrating solar plants: a multiphase model", *Heat Transfer Engineering*, vol. 35, pp. 224-231, 2013.
- [7] F. Middleton, "An all metal UHV flange seal for dissimilar materials", *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 28, no. 3, pp. 3298-3299, June 1981.
doi: 10.1109/TNS.1981.4332084
- [8] Q. Yin, and Y. Li, "Straight wave UT technical for dissimilar metal weld of nozzle to safe-end in reactor pressure vessel", in *IEEE Far East Forum on Nondestructive Evaluation/Testing*, Chengdu, 2014, pp. 122-127.
doi: 10.1109/FENDT.2014.6928246

- [9] H. Chen, Z. Yu, W. Wang, G. Ma, and M. Hong, "Research on ultrasonic inspection of control rod drive mechanism housing weld in Chinese evolutionary pressurized reactor nuclear power plant," in *IEEE Far East Forum on Nondestructive Evaluation/Testing*, Chengdu, 2014, pp. 128-134. doi: 10.1109/FENDT.2014.6928247
- [10] L. V. Petrushynets, I. V. Falchenko, A. I. Ustinov, O. O. Novomlynets, and S. M. Yushchenko, "Vacuum diffusion welding of intermetallic alloy γ -TiAl with high-temperature alloy EI437B through nanolayered interlayers", in *IEEE 2nd Ukr. Conf. Electr. and Comp. Engineering (UKRCON)*, Lviv, Ukraine, 2019, pp. 542-546. doi: 10.1109/UKRCON.2019.8879918
- [11] J. Thamprajamjit, and P. Surin, "Dissimilar metal joining between stainless steel SUS304 and carbon steel SS400 using plasma arc welding process", in *2nd Int. Conf. Engineering Innovation (ICEI)*, Bangkok, 2018, pp. 42-45. doi: 10.1109/ICEI18.2018.8448663
- [12] M. Cavallini, P. Veronesi, L. Lusvarghi, E. Colombini, R. Giovanardi, and L. Rigon, "Optimization of laser welding of dissimilar corrosion resistant alloys", in *IEEE 3rd Int. Forum on Research and Technologies for Society and Industry (RTSI)*, Modena, 2017, pp. 1-5. doi: 10.1109/RTSI.2017.8065935
- [13] PGV-1000M steam generator. Description and main features. [Online]. Available: <http://desnogorskspektr.ru/aes/teoriya-aes/parogenerator-pgv-1000m.-opisanie-i-osnovnye-harakteristiki.html>. Accessed on: Nov. 19, 2019.
- [14] O. P. Shugaylo, "Stress-strain state of tubular elements of steam generators in emergency situations", Ph.D. dissertation, NAS of Ukraine, S. P. Tymoshenko Institute of Mechanics. Kyiv, 2019 [in Ukrainian].
- [15] T. Kh. Margulova, *Nuclear power plants*. Moscow: Vysshaya shkola, 1984 [in Russian].
- [16] M. Kh. Zarazovskii, M. V. Borodii, and V. Ja. Kozlov, "Risk-oriented approach to the prediction of integrity and optimization of the control of heat exchange equipment with high defect statistics", *Yaderna ta radiatsiina bezpeka*, vol. 4, pp. 32-38, 2016 [in Russian].
- [17] IAEA-TECDOC-1577. Strategy for Assessment of WWER Steam Generator Tube Integrity, Vienna: IAEA, 2007.
- [18] V. V. Müller, and V. N. Mitroshin, "Automatic system of shape weld stabilization with manual and mechanized argon-arc welding by non-consumable electrode", in *Int. Rus. Automation Conf. (RusAutoCon)*, Sochi, 2018, pp. 1-5. doi: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501708
- [19] M. Bodeau, "Mitigating potential hazards of TIG welding on spacecraft", in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 61, no. 1, pp. 90-99, Feb. 2019. doi: 10.1109/TEMC.2018.2813331
- [20] A. R. Kohandehghan, S. Serajzadeh, and A. H. Kokabi, "A study on residual stresses in gas tungsten arc welding of AA5251", *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 25, pp. 1242-1250, 2010.
- [21] L. Markashova, O. Berdnikova, A. Bernatskyi, M. Iurzhenko, and V. Sydorets, "Physical and mechanical properties of high-strength steel joints produced by laser welding", *IEEE Int. Young Scientists Forum on Appl. Physics and Engineering (YSF)*, Lviv, 2017, pp. 88-91. doi: 10.1109/YSF.2017.8126596
- [22] S. Katayama, *Handbook of laser welding technologies*. Cambridge, Woodhead Publishing Ltd., 2013.
- [23] A. Kurc-Lisiecka, A. Lisiecki, "Laser welding of the new grade of advanced high-strength steel DOMEX 960", *Materiali in tehnologije / Materials and technology*, vol. 51, no. 7, pp. 199-204, 2017.
- [24] Technologies for non-destructive testing and repair of NPP components NUSIM 2008 VUJE. [Online]. Available: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/43/124/43124116.pdf
- [25] L. Markashova, O. Berdnikova, A. Bernatskyi, V. Sydorets, and O. Bushma, "Crack resistance of 14KhGN2MDAFB high-strength steel joints manufactured by laser welding", *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, vol. 224, iss. 1, p. 012013, 2019. doi:10.1088/1755-1315/224/1/012013
- [26] H. Vemanaboina, S. Akella, R. K. Buddu, and E. Gundabattini, "Distortion validation of laser beam welded SS316LN steel

plates", *8th Int. Conf. Modeling Simulation and Appl. Optimization (ICMSAO)*, Manama, Bahrain, 2019, pp. 1-5.
doi: 10.1109/ICMSAO. 2019.8880444

[27] H. Murakawa, "Residual stress and distortion in laser welding", in *Handbook of Laser Welding Technologies*, Cambridge, Woodhead Publishing Ltd., 2013, pp. 374-400.

A. V. Bernatskyi, *Ph. D.*,

V. D. Sheliagin, *Ph. D.*, senior researcher,

V. M. Sydorets, *D. Tech. Sc.*, professor,

O. M. Berdnikova, *Ph. D.*, senior researcher,

O. V. Siora, researcher,

T. M. Nabok, junior researcher

E. O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine

K. Malevycha str., 11, Kyiv, 03150, Ukraine

DETERMINATION OF TECHNOLOGICAL FEATURES OF LASER WELDING OF BUTT JOINTS OF DIFFERENT STAINLESS AUSTENITIC STEELS IN VERTICAL SPATIAL POSITION

The problem of repair of collectors of steam generators of nuclear power plants (NPPs) has become extremely urgent today. The way of pressurization of heat exchange tubes by plugs is promising, provided the quality of the joints is high. Practical experience in the use of welding to solve this problem has shown the need to find technological solutions related to increasing the depth of penetration and reducing the thermal impact area. The purpose of the work was to determine technological features of laser welding of joints of heterogeneous stainless austenitic steels in vertical spatial position with subsequent application of the results to solve the above problem. Two technological options for plugs welding in using rectilinear and annular butt joints in vertical position with different weld shape factors have been proposed. Laser welding modes have been worked out and samples of welded joints have been made. According to the results of the analysis of the data of mechanical tests, visual and radiographic control, tightness tests and metallographic studies, the appropriate modes of laser welding of plugs for each of the two options have been determined. The annular butt welded joint of the type "plate-pipe" of 10X18H10T (pipe) and 10X17H13M3T (plate) steels, made in vertical position, was the main type. Static tensile test data indicate that for welds with a joint ratio of greater than one, a fracture force of about 11% higher is achieved compared to joints of less than one. The main causes of defects in laser welding of annular welded joints of heterogeneous stainless steels are revealed and the ways of their elimination and prevention of their appearance are offered. Principal technological techniques of laser welding of annular welded joints of heterogeneous steels in different spatial positions have been developed. On the basis of the results of the conducted researches technological recommendations on laser welding of plugs in heat exchange tubes of the collector have been formulated, which will significantly improve the technology of repair of steam generators of nuclear power plants.

Keywords: laser welding, annular butt joints, stainless steels, heterogeneous welded joints, spatial position, steam generator, nuclear power plant, repair.

Стаття надійшла 01.11.2019

Прийнято 21.11.2019