

# РОЗРОБКА ДИСТАНЦІЙНО КЕРОВАНОГО ОБЛАДНАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ЛАЗЕРНОГО ЗВАРЮВАННЯ ДЛЯ РЕМОНТУ І ВІДНОВЛЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ПАРОГЕНЕРАТОРІВ АЕС

В.Д. Шелягін, А.В. Бернацький, О.В. Сіора, В.А. Курило, О.М. Сучек

ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

Зварювали контрольні прямолінійні стикові з'єднання з листових заготовок зі сталей 10X18H10T та 10X17H13M3T в вертикальному просторовому положенні з неповним проваром по товщині; виконували візуальний та радіографічний контроль, металографічні дослідження та визначали мікротвердість зварних з'єднань. Визначали параметри технологічних режимів зварювання досліджуваних кільцевих зварних з'єднань. 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. В результаті роботи показано, що місце початку зварювання впливає на розміри ділянки шва, на якій процес зварювання стабілізується та досягається задана глибина провару. Розроблені авторами технологічні прийоми відпрацьовано на зразках-імітаторах при проведенні дослідно-промислових випробувань на макеті дистанційно керованого обладнання, створеного для ремонту та відновлення працездатності парогенераторів типу ПГВ-1000М. Бібліогр. 18, табл. 2., рис. 9.

*Ключові слова:* ремонт парогенератора АЕС, теплообмінні трубки, лазерне зварювання, технологія, обладнання

Теплообмінні апарати призначені для обміну тепловою енергією між двома або декількома середовищами та широко застосовуються в енергетиці, харчовій, хімічній та інших галузях промисловості. У конструкціях теплообмінних апаратів для одержання високих експлуатаційних властивостей досить часто застосовують комбіновані вузли з різномірних металів, що дозволяє більш повно реалізувати переваги кожного з них. При цьому також постає складна задача виготовлення та ремонту таких конструкцій, оскільки, при необхідності застосування технологій зварювання, потребує вирішення задача зварювання різномірних металів. Її вирішення є більш складним у порівнянні зі зварюванням однорідних матеріалів [1–3]. 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 (АЕС) експлуатується 15 атомних енергоблоків, з яких 13 типу ВВЕР-1000 і два – ВВЕР-440, загальною встановленою потужністю 13835 МВт [4]. 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 [5]. В даний час на АЕС України експлуатуються 52 горизонтальних ПГ, напрацювання яких складає

від 10 до 130 тис. год [6]. Корпус ПГ у середній частині зварений з двома вертикальними колекторами першого контуру, призначеними для з'єднання з 11000 теплообмінними трубами (ТОТ), зігнутими в U-подібні зміювики [5]. 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 між осями [7], а мінімальна відстань між зовнішніми стінками ТОТ становить 6 мм (рис. 1). Корпус колектору 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 складає близько 3 мм.

Кінці зміювиків на ПГ, виготовлених до 1990 р., закладались в отвори колектору з подальшим вальцюванням на всю глибину закладення методом вибуху [7]. Кінці зміювиків на ПГ, виготовлених з 1990 р., вальцювалися після закладення у отворах колектору методом гідророздачі і механічного довальцювання вихідної ділянки. Торці зміювиків в обох варіантах були зварені з антикорозійним наплавленням колектору аргонодуговим способом.

В процесі експлуатації ПГ виявлялись різні випадки їх руйнування [5–8]. Однією з найважливіших умов безпечної експлуатації енергоблоків з реакторами типу ВВЕР є відсутність протікання

Шелягін В.Д. – <https://orcid.org/0000-0001-8153-6533>, Бернацький А.В. – <https://orcid.org/0000-0002-8050-5580>, Сіора О.В. – <https://orcid.org/0000-0003-1927-790X>, Курило В.А. – <https://orcid.org/0000-0003-0790-9404>, Сучек О.М. – <https://orcid.org/0000-0002-8961-3887>

© В.Д. Шелягін, А.В. Бернацький, О.В. Сіора, В.А. Курило, О.М. Сучек, 2020

теплоносія з першого контуру в другий [8]. Теплообмінні трубки забезпечують передачу тепла від теплоносія першого контуру до другого і є захисним бар'єром між ними. Пошкодження ТОТ може призвести до потрапляння радіоактивного теплоносія першого контуру в другий, що порушує безпеку ядерних енергоблоків.

Механізми пошкодження ТОТ ПГ детально описані в документі ІАЕА [9]. Показано, що головною причиною пошкоджень ТОТ є загальна корозія, пітінги, корозійне розтріскування під напруженням та поєднання пітінгів 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 і інтенсивне зростання дефектів розтріскування в умовах нормальної експлуатації може призводити до течій з першого контуру в другий. При виникненні такої ситуації блок зупиняють на позаплановий ремонт. Дефектні ТОТ герметизують встановленням заглушки (рис. 2), 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 схеми ремонту (див. рис. 2) стикове кільцеве зварне з'єднання заглушки з корпусом колектору ПГ повинно бути виконано у вертикальному просторовому положенні з неповним проваром (мінімальна глибина провару 1,5 мм) та локалізованою зоною плавлення.

Аргонодугове зварювання [10–12], що зараз використовується при ремонті, характеризується підвищеним тепловкладенням у зварювані деталі й недостатньою концентрацією теплового джерела у порівнянні з лазерним зварюванням [13–17]. Коefіцієнт форми шва  $K_\phi$  (відношення ширини шва до глибини провару) при аргонодуговому зварюванні складає 2...4. При виконанні умови забезпечен-

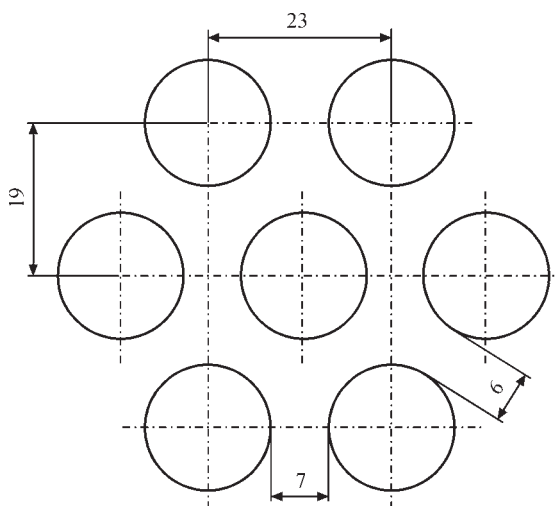


Рис. 1. Схема розташування теплообмінних трубок у ПГ

ня мінімальної глибини провару не менше 1,5 мм це призводить до збільшення діаметру кільцевого зварного з'єднання з заглушкою (рис. 3) [18]. Внаслідок цього відбувається перегрів деталей та негативний вплив на сусідні з'єднання, пов'язаний зі зростанням залишкових напружень. Область впливу приблизно співпадає з зоною кольорів мінливості (див. рис. 3). Все це обмежує можливості застосування аргонодугового зварювання для ремонту ПГ типу ПГВ-1000М.

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. Це 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 високо концентроване джерело енергії може забезпечити вкрай малий локальний термічний вплив на конструкцію та більший експлуатаційний ресурс зварних з'єднань.

Метою роботи була розробка дистанційно керуваного автоматичного обладнання та відпрацювання технології лазерного зварювання для ремонту та відновлення працездатності парогенераторів типу ПГВ-1000М.

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

Для визначення технологічних особливостей лазерного зварювання зварних з'єднань з різномірних нержавіючих аустенітних сталей в вертикальному

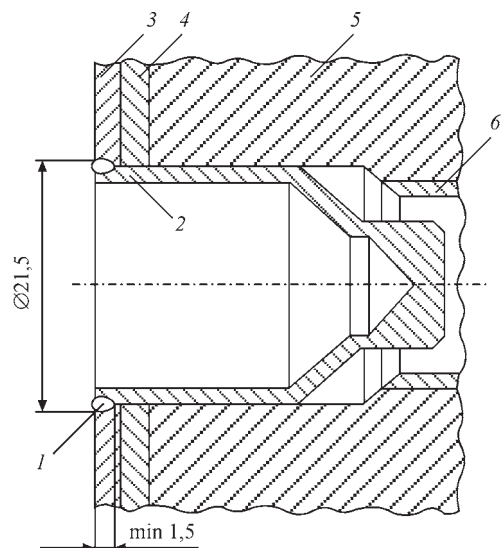


Рис. 2. Схема вварювання заглушки: 1 – шов; 2 – заглушка; 3 – перший шар наплавлення; 4 – другий шар наплавлення; 5 – стінка ПГ; 6 – ТОТ



Рис. 3. Заглушка встановлена із застосуванням аргонодугового зварювання [18]

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 (межа міцності  $\sigma_b = 520...550$  МПа) та 10X17H13M3T (межа міцності  $\sigma_b = 510...540$  МПа) в вертикальному просторовому положенні зварювали контрольні прямолінійні стикові з'єднання з коефіцієнтом форми шва  $K_\phi < 1$  з неповним проваром по товщині.

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» (рис. 4) 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 заготовками довжиною 100 мм зі сталі 10X18H10T (із зовнішнім діаметром труби 20 мм й 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  $K_\phi < 1$ .

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

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

7. На розробленому макеті лабораторного стану із лазерного вварювання заглушок проводили дослідно-промислові випробування створеного дистанційно керованого обладнання на зразках-імітаторах.

Роботи з визначення технологічних особливостей одержання кільцевих зварних з'єднань з нержавіючих сталей у вертикальному просторовому положенні виконували на лабораторному стенді, 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 наступних 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 у якості захисного газу з витратами 333 см<sup>3</sup>/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».

Встановлено, що характерними дефектами, що утворюються при лазерному зварюванні прямолінійних контрольних стикових з'єднань листових зразків з нержавіючих сталей у вертикальному просторовому положенні можуть бути подрізи, несплавлення, усадочні раковини та раковини у кратері, перевищення випуклості, поодинокі пори та порожнини або їхні ланцюжки.

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 дозволяли одержувати стикові зварні з'єднання категорії якості не нижче «С», згідно ДСТУ EN ISO 13919–1:2015.



Рис. 4. З'єднання типу «пластина–труба» після лазерного зварювання

Таблиця 1. Хімічний склад сталей, що зварювались, мас. %

Сталь	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Ti	Fe
10X18H10T	< 0,1	< 0,8	1...2	10...11	< 0,2	< 0,035	17–19	< 0,6	Решта
10X17H13M3T	< 0,1	< 0,8	< 2	12...14	< 0,2	< 0,035	16–18	< 0,7	—



На цих режимах у вертикальному положенні були виготовлені кільцеві стикові зварні з'єднання з коефіцієнтом форми шва  $K_\phi < 1$  та неповним проваром.

В ході проведення механічних випробувань на статичний одноосовий розтяг отримані значення межі міцності  $\sigma_b = 460 \dots 475$  МПа при статичному розтягу кільцевих стикових зварних з'єднань типу «пластина–труба» зі сталей 10X18H10T (труба) і 10X17H13M3T (пластина). Порівняння даних показує, що зусилля руйнування для кільцевих стикових зварних з'єднань типу «пластина–труба» зі сталей 10X18H10T (труба) і 10X17H13M3T (пластина) не менше 80 % зусилля руйнування основного матеріалу труби (сталі 10X18H10T).

На рис. 5 наведено фото структури, характерної 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  $K_\phi < 1$ .

Структура металу шва зварного з'єднання, показаного на рис. 5, а дисперсна літа та розділена на 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 (рис. 5, б) являє собою аустенітну матрицю з невеликою кількістю  $\delta$ -фериту (1,5...1,7 %). Розмір комірок становить в основному 12...13 мкм. Твердість металу шва у центральній частині складає HV1–2950...3090 МПа. Є ділянки, де твердість підвищується до HV1–3200...3380 МПа. В нижній частині шва твердість досягає значень HV1–3320...3650 МПа. На лінії сплавлення (рис. 5, в) мікроструктура також складається з аустеніту і  $\delta$ -фериту, але структура дрібніша, ніж в центрі шва. Ширина кристалітів становить 2...9 мкм. Твердість металу на лінії сплавлення складає HV1–2990...3030 МПа, є окремі ділянки, де твердість підвищується до HV1–3160 МПа. У металі шва спостерігаються нітриди (в значній кількості). Зона термічного впливу (ЗТВ) не виражена, її структура складається з аустеніту і  $\delta$ -фериту. Бал зерна в ме-

талі ЗТВ зварного з'єднання № 6. Твердість ЗТВ становить HV1–2650...2840 МПа. У металі ЗТВ спостерігаються нітриди.

**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 збільшенні швидкості зварювання з 47 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 % (рис. 6).

Найменше значення сумарної кількості проекцій пор (0,14 %) зафіксовано при розфокусуванні –1 мм, що майже в 1,5 рази менше у порівнянні зі зварюванням з аналогічними параметрами по швидкості та потужності лазерного випромінювання, але з величиною розфокусування +2 мм (рис. 6).

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 до 88 мм/с, відповідно (рис. 7).

Були виявлені всі види дефектів отриманих з'єднань. Розроблені і перевірені на практиці засоби усунення цих дефектів та їх запобігання наведено у табл. 2.

Проведений комплексний аналіз результатів досліджень та випробувань дозволив визначити режими зварювання заглушок. 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.

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

- наявність ділянки наростання потужності лазерного випромінювання на початку зварювання та ділянки спадання в кінці, для запобігання утворенню усадочних раковин та раковин в кратері;
- параметри технологічних режимів (потужність лазерного випромінювання; час та швидкість зварю-

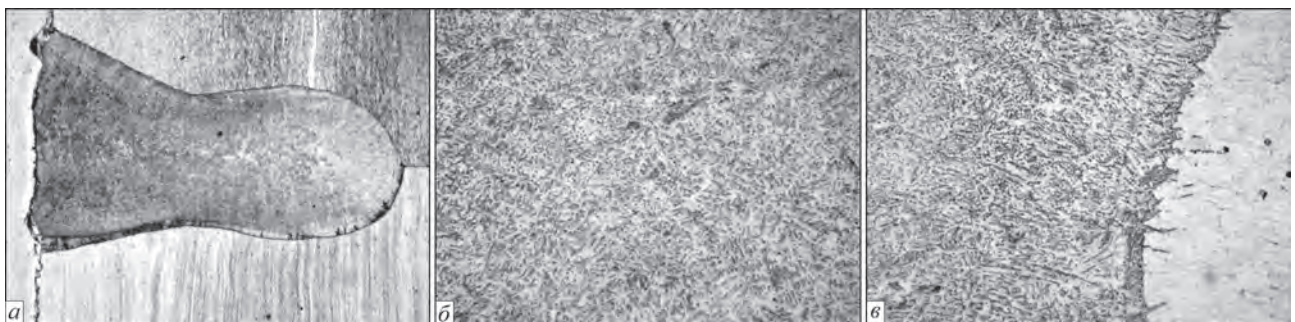


Рис. 5. Структура одержаного зварного з'єднання зі сталей 10X18H10T і 10X17H13M3T: а – макроструктура ( $\times 50$ ); б – структура металу у центральній частині шва ( $\times 400$ ); в – структура металу у лінії сплавлення ( $\times 400$ )

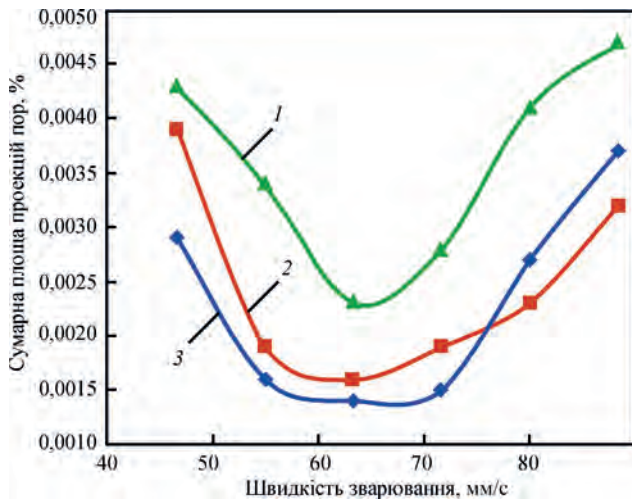


Рис. 6. Сумарна площа проєкцій пор, в залежності від швидкості та величини розфокусування лазерного зварювання. Розфокусування, мм: 1 – +2; 2 – 0; 3 – -1; потужність  $P = 4,4$  кВт

вання; розташування фокусу лінзи, тощо) для ділянки наростання потужності лазерного випромінювання на початку зварювання та ділянки спадання в кінці, повинні бути визначені емпірично для кожного варіанту;

– ділянки швів на початку та в кінці зварювання, які не відповідають умовам досягнення необхідної глибини 1,5 мм, потребують повторного переварювання для забезпечення заданої глибини провару;

– на відміну від дугового зварювання не має необхідності корегувати параметри (потужність лазерного випромінювання; час та швидкість зварювання) в залежності від проходження ділянки умовного годинника, тому що після проходження ділянки з одночасним наростанням потужності лазерного випромінювання та швидкості зварювання процес стабілізується та на всіх ділянках зварювання умовного годинника («на спуск» з 12 до 6 год та напрямком за годинниковою стрілкою; «на підйом» з 6 до 12 год та напрямком за годинниковою стрілкою, тощо) можливо досягнення заданої глибини провару;

– напрямок руху при зварюванні за годинниковою стрілкою умовного годинника чи проти неї, не відіграє значного впливу на структуру та характеристики зварного з'єднання при досягненні заданої глибини;

– місце початку зварювання впливає на розміри ділянки шва, на якій процес зварювання стабілізується та досягається задана глибина провару;

Таблиця 2. Засоби усунення або запобігання дефектів

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'єктиву

– для одержання рівня якості «В високий» рекомендується для зварних з'єднань з коефіцієнтом форми шва  $K_{\phi} < 1$ , місцем початку руху обирати «9 год» 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 в вертикальному положенні з коефіцієнтом форми шва  $K_{\phi} < 1$  з неповним проваром, що відповідають вимогам категорії якості «високий В» стандарту ДСТУ EN ISO 13919-1:2015.

Проведений комплексний аналіз результатів досліджень та випробувань дозволив визначити режими вварювання заглушок. Критерієм відбору доцільних параметрів режимів лазерного зварювання кільцевих зварних з'єднань служили умови відповідності вимогам категорії якості «високий В» стандарту ДСТУ EN ISO 13919-1:2015. Для одержання зварних з'єднань з коефіцієнтом форми шва  $K_{\phi} < 1$  лазерне зварювання заглушок запропоновано виконувати з наступними технологічними параметрами: потужність лазерного випромінювання 4,4 кВт; швидкість зварювання 63,33 мм/с; величина розфокусування – 1 мм; витрати захисного газу

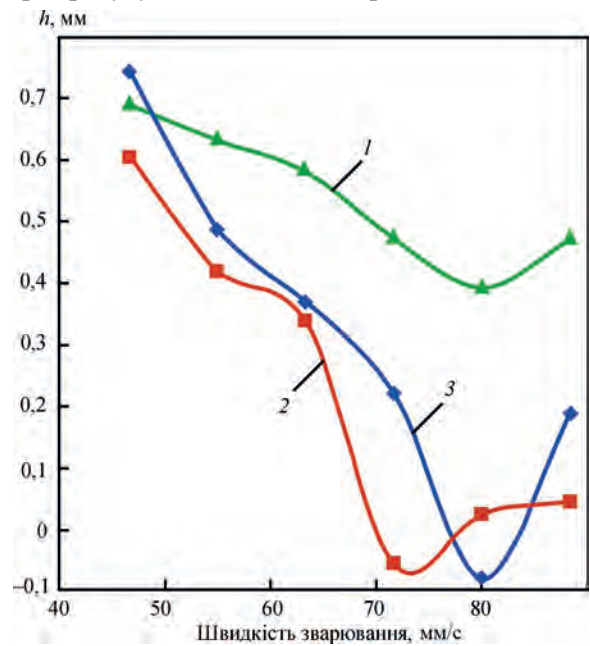


Рис. 7. Підсилення верхнього валика шва зварного з'єднання в залежності від швидкості лазерного зварювання. Потужність, кВт: 1 – 4,4; 2 – 4,0; 3 – 3,6; розфокусування – 2 мм



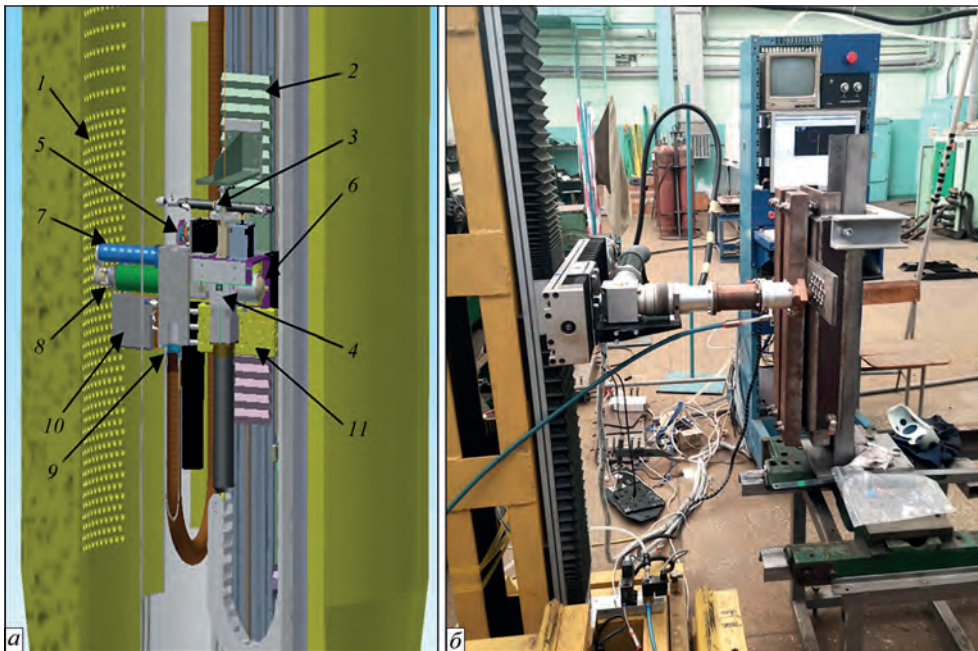


Рис. 8. 3D-модель (а) та діючий макет (б) обладнання для лазерного дистанційно керованого зварювання заглушок колектора парогенератора: 1 – стінка колектора; 2 – каретка маніпулятора; 3 – автоматизований пристрій встановлення заглушки; 4 – корпус оптики лазерної зварювальної головки; 5 – сканатор; 6 – відеокамера; 7 – гофрорукав для видалення випаровувань; 8 – пристрій газового захисту; 9 – система фільтрації; 10 – датчик визначення положення місця зварювання; 11 – привід датчику визначення положення місця зварювання

(аргон) 0,33 л/с (333 см<sup>3</sup>/с); початок руху – з «9 год» умовного годинника; напрямок руху – за годинниковою стрілкою. Під час виконання зварювання за вказаним режимом механізм переміщення здійснює два повних оберти за годинниковою стрілкою, а потужність лазерного випромінювання змінюється програмою за спеціалізованим циклом. Завдяки цьому забезпечуються етапи зростання глибини провару, її стабілізації та зменшення, а також відсутність дефектів у вигляді кратерів.

Розроблено 3D-модель (рис. 8, а) та ескізний проект обладнання для дистанційно керованого зварювання заглушок. На його підставі виготовлено діючий макет лабораторного стенду із лазерно-

го дистанційно керованого зварювання заглушок (рис. 8, б). На створеному макеті проведено дослідно-промислові випробування створеного дистанційно керованого обладнання для ремонту та відновлення працездатності парогенераторів типу ПГВ-1000М на зразках-імітаторах (рис. 9).

За результатами візуального контролю та порівняльним аналізом геометричних характеристик зварних з'єднань, що були одержані лазерним (рис. 9) та аргонодуговим зварюванням, встановлено їх основні відмінності. Для аргонодугового зварювання характерним є взаємне перекриття сусідніх зварних з'єднань. На відміну від аргонодугового лазерне зварювання забезпечує вкрай локальний термічний вплив, за рахунок чого може бути підвищений експлуатаційний ресурс зварних з'єднань.

### Висновки

1. Розроблено дистанційно кероване автоматичне обладнання та відпрацьовано технології лазерного зварювання для ремонту та відновлення працездатності парогенераторів типу ПГВ-1000.

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

3. Аналіз основних причин виникнення дефектів при лазерному зварюванні кільцевих зварних з'єднань з різнорідних нержавіючих сталей дозволив



Рис. 9. Зовнішній вигляд зварних з'єднань на зразках-імітаторах з заглушками, звареними лазерним зварюванням

запропонувати і перевірити на практиці заходи усунення цих дефектів та запобігання їх утворенню.

### Список літератури/References

1. Kvasnytskyi, V.V., Kvasnytskyi, V.F., Hexing, C. et al. (2018). Diffusion welding and brazing of dissimilar materials with controlled stress-strain state. *The Paton Welding J.*, **12**, 70–76. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2018.12.07>
2. Wu, Q., Xu, Q., Jiang, Y., Gong, J. (2020). Effect of carbon migration on mechanical properties of dissimilar weld joint. *Engineering Failure Analysis*, **117**, 104935. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104935>
3. Kvasnitsky, V.V., Kvasnitsky, V.F., Markashova, L.I., Matvienko, M.V. (2014) Effect of stress-strain state on structure and properties of joints in diffusion welding of dissimilar metals. *The Paton Welding J.*, **8**, 8–14. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2014.08.01>
4. Державне підприємство «Національна атомна енергогенеруюча компанія «Енергоатом» (2018). Стратегічний план розвитку державного підприємства «Національна атомна енергогенеруюча компанія «Енергоатом» на 2018–2022 рр.». Державне підприємство «Національна атомна енергогенеруюча компанія «Енергоатом». [http://www.energoatom.com.ua/files/file/strateg\\_chniy\\_plan\\_2018\\_2022\\_04042018.pdf](http://www.energoatom.com.ua/files/file/strateg_chniy_plan_2018_2022_04042018.pdf)  
(2018) State Enterprise «National Nuclear Energy Generating Company «Energoatom». *Strategic plan of development of State Enterprise «National Nuclear Energy Generating Company «Energoatom» for 2018–2022* [in Ukrainian]. [http://www.energoatom.com.ua/files/file/strateg\\_chniy\\_plan\\_2018\\_2022\\_04042018.pdf](http://www.energoatom.com.ua/files/file/strateg_chniy_plan_2018_2022_04042018.pdf)
5. Парогенератор ПГВ-1000М. *Описание и основные характеристики*. <http://desnogorskspetr.ru/aes/teoriya-aes/parogenerator-pgv-1000m.-opisanie-i-osnovnyie-harakteristiki.html>  
Steam generator PGV-1000M. *Description and main characteristics*. <http://desnogorskspetr.ru/aes/teoriya-aes/parogenerator-pgv-1000m.-opisanie-i-osnovnyie-harakteristiki.html> [in Russian].
6. Шугайло О.П. (2019). *Напружено-деформований стан трубчатих елементів парогенераторів при аварійних ситуаціях*. Дис. ... канд. техн. наук НАН України. Київ, Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка.
7. Shugailo, O.P. (2019) *Stress-strain state steam generator tubular elements in emergencies*. In: *Syn. of Thesis for Cand. of Tekhn. Sci. Degree*. Kyiv, IM [in Ukrainian].
7. Маргулова Т.Х. (1984). *Атомные электрические станции*. Москва, Высш. шк.
8. Margulova, T.Kh. (1984) *Nuclear power stations*. Moscow, Vysshaya Shkola [in Russian].
8. Заразовский М.Н., Бородий М.В., Козлов В.Я. (2016). Риск-ориентированный подход к прогнозированию целостности и оптимизации контроля теплообменного оборудования с большой статистикой дефектов. *Ядерная радиационная безопасность*, **4**, 32–38.
9. Zarazovsky, M.N., Borodij, M.V., Kozlov, V.Ya. (2016) Risk-oriented approach to prediction of integrity and optimization of control of heat-exchange equipment with large defect statistics. *Yaderna ta Radiatsiina Bezpeka*, **4**, 32–38 [in Russian].
9. IAEA-TECDOC-1577. (2007). *Strategy for assessment of WWER steam generator tube integrity*. Vienna, IAEA.
10. Xiang, J., Chen, F.F., Park, H. et al. (2020). Numerical study of the metal vapour transport in tungsten inert-gas welding in argon for stainless steel. *Applied Mathematical Modelling*, **79**, 713–728. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2019.11.001>
11. Kumar, S.R., Ravishankar, B., Vijay, M. (2020). Prediction and analysis of magnetically impelled arc butt welded dissimilar metal. *Materials Today: Proceedings*, **27**, 2037–2041. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.09.054>
12. Selvan, C.P.T., Dinaharan, I., Palanivel, R., Kalaiselvan, K. (2020). Predicting the tensile strength and deducing the role of processing conditions of hot wire gas tungsten arc welded pure nickel tubes using an empirical relationship. *Int. J. Pressure Vessels and Piping*, **188**, 104220. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2020.104220>
13. Sahul, M., Tomčiková, E., Sahul, M. et al. (2020). Effect of disk laser beam offset on the microstructure and mechanical properties of copper – AISI 304 stainless steel dissimilar metals joints. *Metals*, **10**, 1294. DOI: <https://doi.org/10.3390/met10101294>
14. Ramakrishna R., V.S.M., Amrutha, P.H.S.L.R., Rahman Rashid, R.A., Palanisamy, S. (2020). Narrow gap laser welding (NGLW) of structural steels – a technological review and future research recommendations. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **111**, 2277–2300. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06230-9>
15. Shelyagin, V.D., Bernatskyi, A.V., Berdnikova, O.M. et al. Effect of Technological Features of Laser Welding of Titanium-Aluminium Structures on the Microstructure Formation of Welded Joints. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* **42**, 363–379. DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.42.03.0363>
16. Li, L., Mi, G., Zhang, X. et al. (2019). The influence of induction pre-heating on microstructure and mechanical properties of S690QL steel joints by laser welding. *Optics & Laser Technology*, **119**, 105606. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.105606>
17. Soltani, H.M., Tayebi, M. (2018). Comparative study of AISI 304L to AISI 316L stainless steels joints by TIG and Nd: YAG laser welding. *J. of Alloys and Compounds*, **767**, 112–121. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.06.302>
18. *Technologies for non-destructive testing and repair of NPP components*. NUSIM 2008 VUJE. [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/43/124/43124116.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/43/124/43124116.pdf).

## DEVELOPMENT OF REMOTELY-CONTROLLED EQUIPMENT AND TECHNOLOGY FOR LASER WELDING AND RESTORATION OF PERFORMANCE OF NPS STEAM GENERATORS

V.D. Shelyagin, A.V. Bernatskyi, O.V. Siora, V.A. Kurilo, O.M. Suchek

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

Control straight butt joints of 10Kh18N10T and 10Kh17N13M3T steel blanks were welded in the vertical position with incomplete penetration by the thickness. Visual and radiographic examination, and metallographic investigations were performed, and welded joint microhardness was determined. Parameters of technological welding modes of the studied circumferential welded joints were established. Conditions of compliance with quality category «high B» of DSTU EN ISO 13919-1:2015 standard were the criterion for selection of appropriate parameters of the modes of laser welding of circumferential butt joints. As a result of work performance, it is shown that the point of welding start influences the dimensions of the weld section, in which the welding process is stabilized, and specified penetration depth is achieved. The techniques developed by the authors were verified on simulator-samples during experimental-industrial trials of the prototype of remotely-controlled equipment developed for repair and restoration of performance of PGV-1000M type steam generators. 18 Ref., 2 Tabl., 9 Fig.

*Keywords: repair of NPS generators, heat-exchanger tubes, laser welding, technology, equipment*

Надійшла до редакції 11.11.2020