

**В.Д. Шелягін, А.Г. Лукашенко,  
В.Ю. Хаскін, Д.А. Лукашенко, В.А. Лукашенко**

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

## **РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ЛАЗЕРНОГО ЗВАРЮВАННЯ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ТЕПЛООБМІННИКІВ КОРАБЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ**



*На підставі розробленої технології автоматизованого лазерного зварювання плоских трубок з мідно-нікелевих сплавів спроектовано і створено технологічне оснащення лазерного зварювального комплексу, яке може бути впроваджено на підприємствах машинобудівної, авіакосмічної, суднобудівної або автомобілебудівної промисловості. Для контролю герметичності зварених плоских трубок розроблена методика, яка полягає у випробуванні зразків тиском і пошуку дефектних ділянок лазерною інтерферометрією в автоматизованому режимі. Для промислового застосування розробленої технології лазерного зварювання спроектована і виготовлена спеціалізована зварювальна головка.*

*Ключові слова: судові теплообмінники, мідно-нікелеві сплави, лазерне зварювання, прорізні з'єднання, імпульсна модуляція випромінювання.*

Для відведення тепла від силових установок (в першу чергу — двигунів) сучасних морських суден використовують теплообмінники, охолоджуючою речовиною яких є морська забортна вода. Основним робочим елементом даних пристроїв є фігурна плоска металева тонкостінна трубка з мідно-нікелевого сплаву. Такі металеві трубки з'єднуються в трубку дошку шляхом зварювання або пайки. Необхідність використання в цих теплообмінниках саме мідно-нікелевих сплавів продиктована умовами роботи, бо теплообмінники потребують високої стійкості до корозії від морської води. Зварні або паяні з'єднання повинні мати високу міцність і повну герметичність за умов тривалої роботи при високих температурах в агресивному середовищі.

При виготовленні теплообмінників перевагу віддають методу зварювання як такому, що

забезпечує більшу надійність і не потребує використання коштовних припоїв. Одним з найбільш перспективних способів зварювання теплообмінників на сьогоднішній день, на думку спеціалістів компанії «АТИС-Лаб», є лазерне зварювання [1]. Так, при виготовленні пластинчастих теплообмінників Альфа Лаваль моделей Компаблок CP 30, CPL 40, CPL 50 і CPL 75 застосовують лазерне зварювання [2]. Пластини і патрубки в різних моделях виготовляються із нержавіючих сталей, титанових і титано-паладієвих сплавів, хастелою тощо. Завдяки застосуванню лазерного зварювання на цих матеріалах вдалося отримати вузькі і тонкі шви, значно знизити загальний тепловий вплив на апарат, зробити його менш сприйнятливим до циклічних і термічних навантажень. Лазерне зварювання дозволило підвищити надійність, збільшити термін служби і уможливило експлуатувати теплообмінники Компаблок в жорстких умовах. Додатковими

перевагами впровадження лазерного зварювання стали автоматизація процесу і зменшення терміну виготовлення теплообмінників.

Автори [3] запропонували замінити паяння лазерним зварюванням при виготовленні тонкостінних охолоджуючих панелей і теплообмінників. Це пов'язано з високими вимогами, які пред'являються до цього устаткування, що працює при високому тиску, підвищених температурах і в режимі неодноразових теплових циклів. Були одержані шви задовільної якості при зварюванні нержавіючих сталей, нікелевих сплавів і титанового сплаву ВТ15, які витримували тиск до 10 МПа.

За даними компанії «Лазерформ» технологія лазерного зварювання була успішно застосована для зварювання тонкостінних труб з товщиною стінки до 1 мм з конструкційних сталей і титанових сплавів, які використовувалися для виробництва теплообмінників для атомної промисловості, де потрібна особливо висока ступінь надійності [4]. Характеристики міцності зварювальних швів були на рівні основного матеріалу, а корозійна стійкість та стійкість до утворення гарячих і холодних тріщин підвищилася.

Однак вказані розробки з лазерного зварювання можуть бути удосконалені за умов застосування імпульсної модуляції лазерного випромінювання. Річ у тому, що цей підхід забезпечує досягнення дрібнозернистої та дрібнодисперсної структури литого металу шва, мінімізує його ширину і зону термічного впливу (ЗТВ). Саме такі характеристики з'єднань здатні забезпечити не лише високу міцність, а й високі значення ударної в'язкості, відносного подовження, корозійної стійкості тощо. Запропонований підхід є актуальним, оскільки теплообмінники з подібними характеристиками можуть працювати в умовах підвищених температур, навантажень і корозійного впливу.

Враховуючи вищесказане, ми поставили за мету створити технологію автоматизованого лазерного зварювання деталей з мідно-нікелевих сплавів теплообмінників корабельних дви-

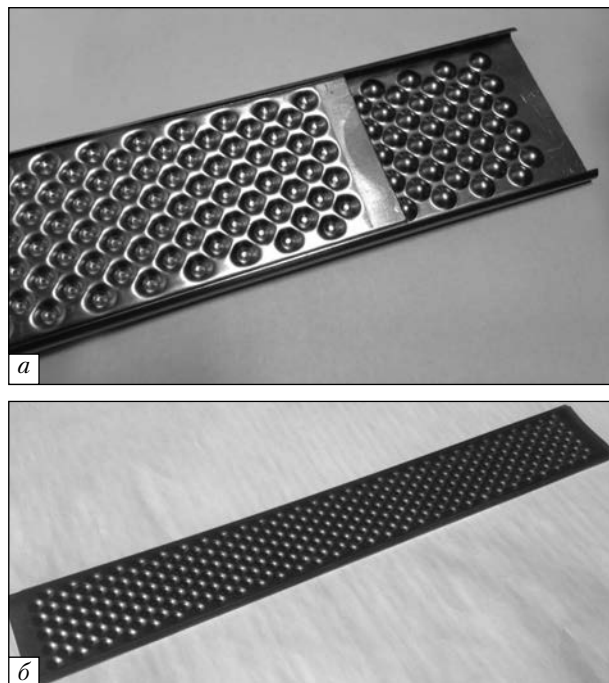
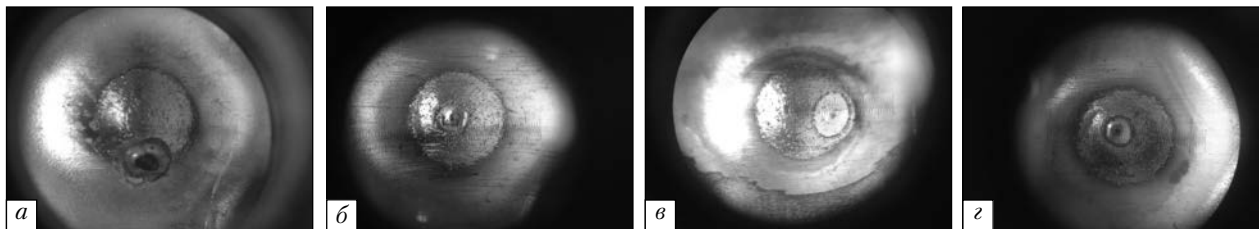


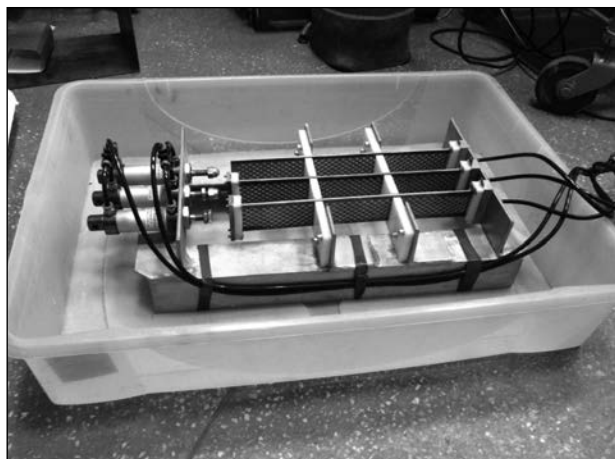
Рис. 1. Зовнішній вигляд заготовок (а), що зварюються при виготовленні трубки теплообмінника (б)

гунів, що використовуються для охолодження забортною водою силових агрегатів морських суден, а також на підставі розробленої технології спроектувати та створити технологічне оснащення лазерного зварювального комплексу, яке може бути впровадженим на підприємствах машинобудівної, авіакосмічної, суднобудівної або автомобілебудівної промисловості.

Для досягнення поставленої мети було проведено низку технологічних досліджень лазерного зварювання зразків з мідно-нікелевого сплаву МН25 товщиною  $\delta = 0,35$  мм. Для цього використовували волоконний лазер моделі YLR-400-AC (фірми IPG, Німеччина) з довжиною хвилі  $\lambda = 1,07$  мкм і потужністю випромінювання до 400 Вт. Оскільки плоскі трубки теплообмінника складаються з двох частин, що з'єднуються між собою не лише по краях, а й по всій площині (рис. 1), то зварювання відпрацьовували прорізними точковими і лінійними швами. До критеріїв якості одержуваних швів відносилися не лише від-



**Рис. 2.** Розробка технології лазерного зварювання прорізних швів у сплаві МН25 ( $\delta = 0,35$  мм): а – пропалення; б – непроварення; в – відхилення від центру лунки; г – якісне з'єднання



**Рис. 3.** Випробувальний стенд для перевірки трубок судових теплообмінників на міцність і герметичність

сутність пор, повне проварювання і якісне формування валиків підсилення, а й досягнення перевіреної міцності та герметичності з'єднань при повітряному тиску усередині трубки до 0,6 МПа (згідно з технічними вимогами). Було встановлено, що для розв'язання цієї задачі доцільно створювати в швах і ЗТВ якомога більш дрібнозернисті структури. Їх можна одержувати різними шляхами. Наприклад, автори роботи [5] пропонують використовувати для цього нанопорошкові модифікатори. Використання таких нанопорошків, як TiN, TiN+Cr, суміш  $Y_2O_3$  і TiNi тощо, дозволяє подрібнювати структуру швів з одночасною зміною їх хімічного складу, що сприяє значному підвищенню механічних властивостей з'єднань. Більш простим шляхом одержання дрібнозернистих структур є застосу-

вання імпульсно-періодичної модуляції лазерного випромінювання.

Авторами [6] було розроблено спосіб лазерного зварювання металів, що включає дію лазерного випромінювання з імпульсом складної форми на поверхню зварюваного металу. Для цього запропоновано локально плавити метал в зоні зварювання імпульсами сфокусованого лазерного випромінювання, які мають крутий передній фронт і плавно спадаючий задній. При цьому задній фронт імпульсів містить дві похилі ділянки, верхня з яких забезпечує плавлення зварюваного металу без інтенсивного випаровування, а нижня забезпечує утворення дрібнозернистої структури зварного шва за рахунок створення умови зародження максимальної кількості центрів кристалізації та мінімізації лінійної швидкості росту кристалів для зварюваного металу. При цьому нижня ділянка модульована частотою ультразвукового діапазону з амплітудою, що забезпечує потрібний нахил ділянки і коливання зварювальної ванни. Введення ультразвукових коливань відбувається без використання додаткового джерела коливань.

Запропонований спосіб лазерного зварювання покладено в основу розроблюваної технології автоматизованого лазерного зварювання деталей теплообмінників корабельних двигунів зі сплавом МН25 ( $\delta = 0,35$  мм) прорізними точковими та лінійними (довжина 350 мм) швами, що використовуються для охолодження заборотною водою силових агрегатів морських суден.

При розробці технології лазерного зварювання враховували такі специфічні фізичні влас-

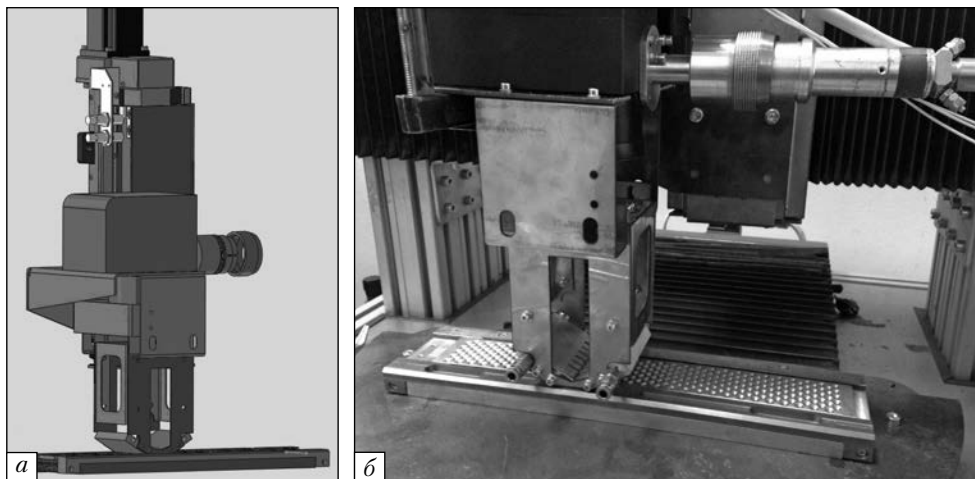


Рис. 4. Проект (а) і зовнішній вигляд (б) системи одночасного газового захисту кількох зон лазерного зварювання

тивості мідно-нікелевого сплаву МН25, як схильність до поглинання газів за рахунок вмісту нікелю при підвищенні температури і висока чутливість до домішок. Ці властивості викликають небезпеку утворення внутрішніх пор і кристалізаційних тріщин. Для усунення вказаних дефектів використовували метод сканування лазерного випромінювання, підбір погонної енергії зварювання, захист зварювальної ванни і шва інертним газом (аргоном). Було встановлено, що для одержання якісних з'єднань необхідна ретельна зачистка зварюваних крайок і прилеглих до них ділянок на ширині 20–25 мм механічним способом, оскільки на них утворюється наліт, що містить сірку, з подальшим знежиренням в ацетоні, уайт-спіриті або бензині. Оскільки для усунення пропалень крайки повинні щільно прилягати одна до одної, заготовки попередньо рихтували.

У ході проведення експериментів з лазерного зварювання сплаву МН25 точковими прорізними швами було встановлено, що характерними дефектами є пропалення, неповарення і відхилення від центру лунки (рис. 2). Прагнення до збільшення діаметра зварної точки завдяки збільшенню фокусної плями привело до порушення гідродинамічної стійкості

зварювальної ванни і її провисання або пропалення. Це могло відбутися також через нерівномірне відведення тепла із зони зварювання (нещільне прилягання верхньої і нижньої заготовок) і нерівномірне вкладення тепла внаслідок відхилення пучка від центру лунки. У разі зварювання лінійних прорізних швів пропалення відбувалося також при нещільному приляганні заготовок, а неповарення — при недостатній погонній енергії лазерного зварювання. У результаті було встановлено, що погонна енергія повинна становити 20–22 Дж/мм, а витрати захисного газу — 6 л/хв.

Для перевірки результатів розробленої технології було сконструйовано стенд, що дозволяє випробовувати три трубки одночасно (рис. 3). Для цього три пневматичні циліндри через муфту ущільнення піджимають заготовку до протилежної муфти, після чого всередину занурених у воду трубок подається стиснуте повітря і здійснюється контроль. Кожна трубка випробовується на герметичність повітряним тиском не менше 0,6 МПа шляхом занурення у воду впродовж однієї хвилини. Контроль зварених зразків проводиться методом пошуку дефектних ділянок при здійсненні випробування тиском на стенді (див. рис. 3). Для авто-

матизації цього пошуку застосовували лазерну інтерферометрію [7].

Для практичного застосування запропонованої технології лазерного зварювання плоских трубок судових теплообмінників було розроблено нове технічне рішення конструкції системи газового захисту зон лазерного зварювання (рис.4). У цій конструкції захисне сопло (свого роду щілина, поперечна повздовжня вісь деталі) мало ширину, яка дещо перевищувала ширину зварюваної деталі. Посередині сопла були виконані захисні притискні планки із отворами для потрапляння сфокусованого випромінювання у зони зварювання. По обидва боки від планок знаходилися трубки із отворами, через які захисний газ (аргон) потрапляв до зон лазерного зварювання. У процесі роботи лазерне випромінювання здійснювало точкове прорізне зварювання за рахунок застосування високошвидкісної безінерційної двокоординатної системи позиціонування, а захисне сопло переміщувалося лінійно вздовж осі зварюваної деталі.

Таким чином, нами було розроблено:

- ✦ технологію лазерного зварювання мідно-нікелевого сплаву МН25 ( $\delta = 0,35$  мм) точковими і лінійними прорізними швами з імпульсною модуляцією випромінювання;
- ✦ методику контролю зварених зразків, що складається з випробування зразків тиском і пошуку дефектних ділянок лазерною інтерферометрією в автоматизованому режимі;

- ✦ спеціалізовану зварювальну головку для промислового застосування розробленої технології лазерного зварювання.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. *Некоторые* особенности производства и применения сварных теплообменников / Компания «АТИС-Лаб» // Электронный ресурс. Режим доступа: <http://atislabs.ru/info/articles/1560/>
2. *Пластинчатый* теплообменник Compabloc® / КБ Теплоэнерго // Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.teploenergo.od.ua/index.php?page=plastinchatyj-teploobmennik-compabloc>.
3. *Медвецкий В.М., Скрипченко А.И., Попов В.О., Сейфуллин Д.Э.* Лазерная сварка тонкостенных охлаждающих панелей и теплообменников // Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.mirprom.ru/public/lazernaya-svarka-tonkostennyh-ohlazhdayushchih-paneley-i-teplo-obmennikov.html>.
4. *Лазерная* сварка теплообменников / Компания «Лазерформ» // Электронный ресурс. Режим доступа: <http://laser-form.ru/component/content/article/2-news/28-2011-12-27-20-49-26.html>.
5. *Черепанов А.Н., Афонин Ю.В., Маликов А.Г., Оришчи А.М.* О применении нанопорошков тугоплавких соединений при лазерной сварке и обработке металлов и сплавов // Тяжелое машиностроение. — 2008. — № 4/2. — С. 25–26.
6. *Патент* України №68159. Спосіб лазерного зварювання / Шелягін В.Д., Лукашенко А.Г., Лукашенко Д.А., Хаскін В.Ю., Сіора О.В., Бернацький А.В., МПК (2012.01) В23К 26/00; 12.03.2012. — 4 с.
7. *Клименко И.С.* Голография сфокусированных изображений и спекл-интерферометрия. — М.: Наука, 1985. — 224 с.

*В.Д. Шелягин, А.Г. Лукашенко, В.Ю. Хаскин,  
Д.А. Лукашенко, В.А. Лукашенко*

Институт электросварки им. Е.О. Патона  
НАН Украины, Киев

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ  
АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ  
ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ  
ТЕПЛООБМЕННИКОВ СУДОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

На основании разработанной технологии автоматизированного лазерного сваривания плоских трубок из медно-никелевых сплавов спроектировано и создано технологическое оснащение лазерного сварочного комплекса, которое может быть внедрено на предприятиях машиностроительной, авиакосмической, судостроительной или автомобилестроительной промышленности. Для контроля герметичности сварных плоских трубок разработана методика, заключающаяся в испытании образцов давлением и поиске дефектных участков лазерной интерферометрией в автоматизированном режиме. Для промышленного применения разработанной технологии лазерной сварки спроектирована и изготовлена специализированная сварочная головка.

*Ключевые слова:* судовые теплообменники, медно-никелевые сплавы, лазерная сварка, прорезные соединения, импульсная модуляция излучения.

*V.D. Shelyagin, A.G. Lukashenko,  
V.Yu. Khaskin, D.A. Lukashenko, V.A. Lukashenko*

Ye.O. Paton Electric Welding Institute  
of the NAS of Ukraine, Kyiv

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY  
AND EQUIPMENT OF THE AUTOMATED  
LASER WELDING FOR MANUFACTURING  
HEAT EXCHANGER DETAILS  
OF MARINE ENGINES

Based on the developed automated laser welding technology for flat tubes of copper-nickel alloys laser welding complex technological equipment, which can be applied on the enterprises of machine building, aerospace, shipbuilding and automobile industries, was designed and created. To control the integrity of welded flat tubes a technique, which consists in testing sample pressure and finding defective sections by laser interferometry in the automated mode, was developed. Specialized welding head was designed and manufactured for the industrial use of the developed laser welding technology.

*Key words:* marine heat exchangers, copper-nickel alloys, laser welding, slitting compounds, pulse-modulated radiation.

Стаття надійшла до редакції 11.03.14