

УДК 621.791.725  
Д 70

## ДОСЛІДЖЕННЯ ГІБРИДНОГО ЛАЗЕРНО-ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ВИСОКОМІЦНИХ СТАЛЕЙ

В. Д. Шелягін, канд. техн. наук, провідний наук. співроб.<sup>1</sup>;

В. Ю. Хаскін, д-р техн. наук, старш. наук. співроб.<sup>1</sup>;

А. В. Бернацький, мол. наук. співроб.<sup>1</sup>;

О. В. Сіора, мол. наук. співроб.<sup>1</sup>;

А. М. Палагеша, інж.<sup>1</sup>;

О. Г. Девоїно, д-р техн. наук, проф.<sup>2</sup>;

М. А. Кардаполова, канд. техн. наук, провідний наук. співроб.<sup>2</sup>;

М. І. Луцко, наук. співроб.<sup>2</sup>;

О. С. Лапковський, мол. наук. співроб.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, м. Київ;

<sup>2</sup>Білоруський Національний Технічний університет, м. Мінськ

**Анотація.** Проведено дослідження з гібридного лазерно-дугового зварювання зразків з високоміцної сталі 14ХГН2МДАФБ. Встановлено вплив основних технологічних параметрів процесу на особливості формування зварних з'єднань.

**Ключові слова:** високоміцні сталі, гібридне лазерно-дугове зварювання, вплив параметрів, зварні з'єднання, структура.

**Аннотация.** Проведены исследования по гибридной лазерно-дуговой сварке образцов из высокопрочной стали 14ХГН2МДАФБ. Установлено влияние основных технологических параметров процесса на особенности формирования сварных соединений.

**Ключевые слова:** высокопрочные стали, гибридная лазерно-дуговая сварка, влияние параметров, сварные соединения, структура.

**Abstract.** The research on hybrid laser-arc welding of high strength steel of the 14ХГН2МДАФБ (14KhGN2MDAFB) type has been done. The influence of the main process parameters on the features of the welded joints formation has been defined.

**Keywords:** high-strength steel, hybrid laser-arc welding, parameters effect, welded joints, structure.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Для підвищення конкурентоздатності виробів машинобудування на світовому ринку при виготовленні металевих конструкцій будівельної та шляхової техніки широко використовуються високоміцні бейнітно-мартенситні сталі з границею плинності більше ніж 700 МПа. Це дозволяє зменшувати металомісткість і енергоємність, підвищувати довговічність і розширювати технічні характеристики машин та механізмів [1]. Зокрема, в галузі кранобудування завдяки такому підходу стало можливим створення автомобільних кранів вантажопідйомністю 200 тонн і більше з вильотом стріли понад 60 метрів. Виготовляються стріли кранів, у тому числі і в Україні, зі сталей товщиною 4...8 мм з використанням механізованого дугового зварювання плавленням у середовищі захисних газів. Однак зростаючі вимоги до експлуатаційних характеристик і до точності геометричних розмірів зварних конструкцій обумовлюють необхідність удосконалення існуючих технологічних процесів їх виготовлення.

### АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

В останні роки у світі з метою зменшення деформації та підвищення якості зварних тонкостінних металевих конструкцій з низьколегованих сталей феритно-перлітного класу при їх виготовленні впроваджується лазерне та гібридне зварювання [3, 4]. Подібний підхід може бути прийнятним і для зварювання високоміцних бейнітно-мартенситних сталей. Але враховуючи те, що такі сталі схильні до утворення низькопластичних гартівних структур та мають підвищену схильність до уповільненого руйнування, яка посилюється під впливом дифузійного водню, виникає необхідність у дослідженні особливостей формування зварних з'єднань при гібридному лазерно-дуговому зварюванні та їх структури.

**МЕТА СТАТТІ** — дослідити вплив технологічних параметрів гібридного лазерно-дугового зварювання на структурні особливості формування зварних з'єднань з високоміцних сталей.

## ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Основні параметри технологічного режиму гібридного зварювання можна розділити на три групи — лазерні, дугові та спільні. До основних лазерних параметрів відносяться потужність випромінювання  $P$  (кВт), розмір фокальної плями  $d_n$  (мм) і розташування фокальної площини відносно поверхні зварюваного зразка  $\Delta F$  (мм). До основних дугових параметрів відносяться зварювальний струм  $I$  (А), напруга на дузі  $U$  (В), швидкість подачі електродного дроту  $V_{др}$  (м/год) і діаметр дроту (мм). До спільних параметрів гібридного процесу відносяться швидкість зварювання  $V_{зв}$  і витрати  $Q$  захисного газу (л/хв).

Для проведення технологічних досліджень, що дозволять встановити тенденції впливу вказаних параметрів на особливості формування зварних з'єднань з високоміцних сталей, було створено два лабораторні стенди. Перший — на базі маніпулятора «Ластівка-1» — призначений для автоматичного лазерного, дугового та гібридного зварювання в нижньому положенні по одній координаті з довжиною ходу до 500 мм. Другий стенд — на базі однокоординатної системи вертикального переміщення — призначений для проведення експериментів зі зварювання «на підйом».

В обох стендах використовували випромінювання Nd:YAG-лазера моделі DY044 (потужність до 4,4 кВт) німецької фірми «ROFIN SINAR», а також джерело живлення електричної дуги ВДУ-601. Матеріалом зразків була сталь 14ХГН2МДАФБ ( $\delta=6$  мм). Для подачі у зону дії лазерного випромінювання електродного дроту Св-10ХН2ГСМФТЮ ( $\varnothing 1,2$  мм) було створено механізм подачі, який забезпечує швидкості від 15 до 100 мм/с. На обох стендах базується гібридна зварювальна головка із системою газового захисту. Ця головка дозволяє вести лазерне зварювання у газовому захисті з використанням оптичної системи з лінзою  $F=300$  мм; зварювання дугою плавкого електрода; лазерне зварювання з присаджувальним дротом діаметром 1,0...1,6 мм; гібридне лазерно-дугове зварювання.

Проведені дослідження показали, що збільшення потужності лазерного випромінювання збільшує глибину провару. Натомість, збільшення розміру фокальної плями зменшує даний показник. Тому розмір плями обрали мінімальним (0,4 мм) і надалі не змінювали. Також оптимізували положення фокальної площини за критерієм досягнення максимальної глибини провару. Встановлено, що при зварюванні зразків товщиною 6 мм це положення має бути 1,5...2,0 мм під поверхнею зразка, тобто фокус повинен бути заглибленим. Напруга на дузі під час експериментів була стабільною, оскільки зварювання проводили в автоматичному режимі з вильотом електрода до 10 мм.

Структуру зварних з'єднань виявляли за допомогою хімічного травлення в 4%-му розчині  $HNO_3$  і вивчали за допомогою оптичного мікроскопу «Neophot-32»,

твердість вимірювали на мікротвердомірі М-400 фірми «Лесо» при навантаженні 1 Н.

Структура основного металу (сталі 14ХГН2МДАФБ) була бейнітно-феритною і мала смугастий характер як наслідок прокату (рис. 1). Її твердість  $HV=2850 \dots 2990$  МПа.

Досліджували структуру швів, одержаних гібридним зварюванням з використанням плавкого електрода з низькою напругою на дузі (аналог STT-процесу) [2]. В усіх випадках потужність лазерного випромінювання становила 4,4 кВт, швидкість зварювання — 16,67 мм/с, витрати суміші захисних газів (18%  $CO_2 + 82\%$  Ar) складала 0,27 л/с, напруга на дузі 3,5...4,0 В (рис. 2). В ході експериментів змінювали зварювальний струм.

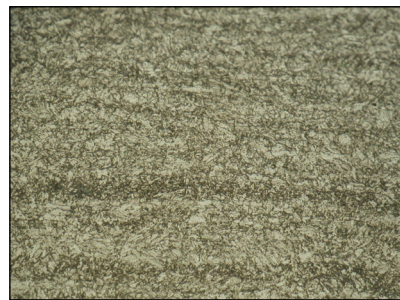
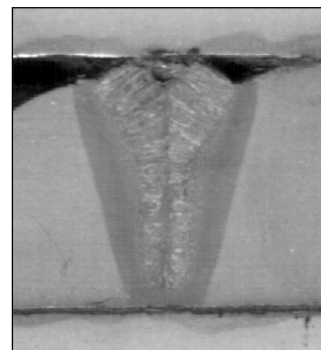
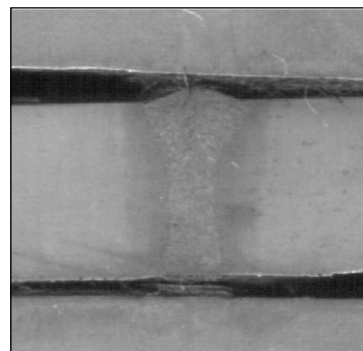


Рис. 1. Структура сталі 14ХГН2МДАФБ,  $\times 400$



a)



b)

Рис. 2. Макроструктура з'єднання сталі 14ХГН2МДАФБ при лазерно-дуговому зварюванні дугою плавким електродом і силі струму  $I=120$  А (a) та  $I=90$  А (б)

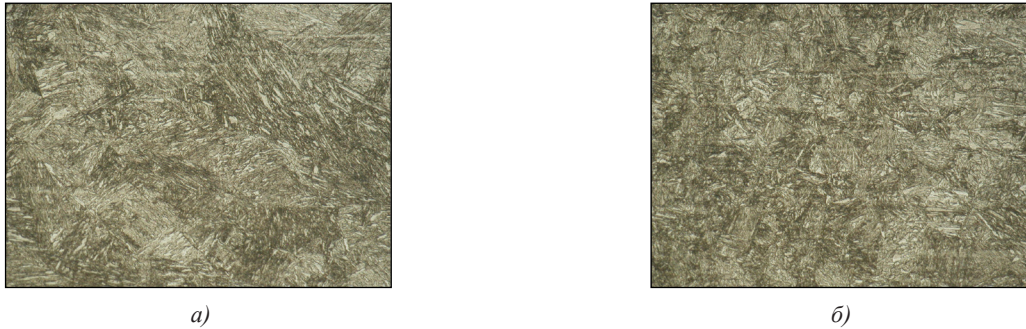


Рис. 3. Мікроструктура шва (а) і зона термічного впливу (б) зразка, показаного на рис. 2, а;  $\times 500$

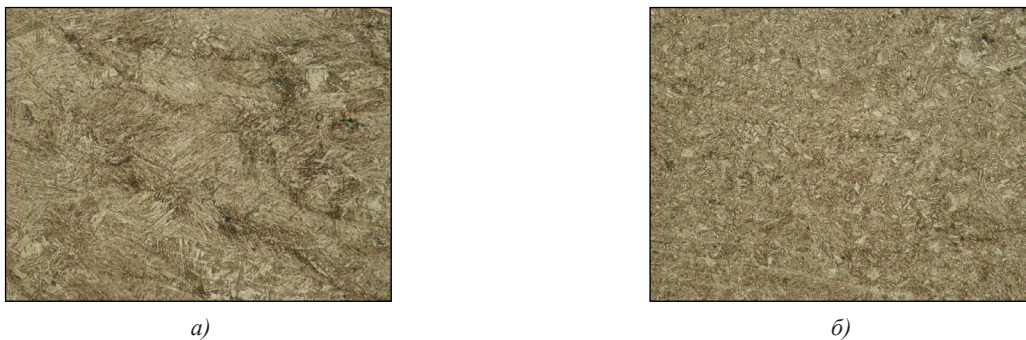


Рис. 4. Структури шва (а) і зона термічного впливу (б) зразка, показаного на рис. 2, б;  $\times 500$

У разі застосування при гібридному зварюванні більшого струму (див. рис. 2, а) структура шва є сумішшю верхнього та нижнього бейніту і незначної кількості мартенситу (рис. 3, а). Твердість швів —  $HV=3830 \dots 4210$  МПа.

Структура зони термічного впливу (ЗТВ) практично не відрізняється від структури шва (див. рис. 3, б). Твердість у зоні впливу  $HV=3870 \dots 4370$  МПа. При віддаленні від лінії сплавлення структура подрібнюється і на ділянці дрібного зерна являє собою бейніт із твердістю  $HV=3870 \dots 4010$  МПа. У верхній частині шва наявні дефекти у вигляді внутрішніх пор.

У разі застосування при гібридному зварюванні дещо меншого струму (див. рис. 2, б) структура шва також є сумішшю верхнього та нижнього бейніту і незначної кількості мартенситу (рис. 4, а).

Твердість швів може дещо збільшуватися за рахунок прискорення відведення тепла —  $HV=4010 \dots 4050$  МПа. Структура металу шва є дещо дрібною. Лінія сплавлення невиражена.

Ділянка перегріву у ЗТВ достатньо вузька — близько 500 мкм. Структура цієї ділянки є сумішшю верхнього та нижнього (переважає) бейніту і незначної кількості мартенситу (див. рис. 4, б); твердість  $HV=3830 \dots 4050$  МПа. При віддаленні

від лінії сплавлення структура подрібнюється і являє собою дрібнозернистий бейніт, ближче до ділянки неповної перекристалізації з'являються невеликі виділення фериту, твердість дещо знижується і становить  $HV=3510 \dots 3830$  МПа. Дефекти шва відсутні.

## ВИСНОВКИ

1. Збільшення зварювального струму пов'язане зі збільшенням об'єму присаджувального металу, який потрапляє до зварювальної ванни через одночасне збільшення швидкості подачі електродного дроту. Тому обидва ці процеси сприяють збільшенню ширини шва і, меншою мірою, збільшенню його глибини.

2. Збільшення швидкості процесу гібридного зварювання призводить не лише до зменшення глибини провару, а й до погіршення якості і стабільності формування верхнього валика підсилення. Натомість, зменшення швидкості відносно оптимальних параметрів призводить до провисання шва.

3. Оптимальними витратами захисного газу визнано межі від 10 до 14 л/хв. Найкращі за якістю формування шви було одержано при використанні максимальної лазерної потужності (4,4 кВт) у поєднанні з малопотужною дугою плавкого електрода — величина зварювального струму становила 90...100 А.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Мусияченко, В. Ф. Свариваемость и технология сварки высокопрочных сталей : курс лекций для специалистов-сварщиков [Текст] / В. Ф. Мусияченко. — К. : Наук. думка, 1983. — 68 с.

- [2] Пат. 754671 Австралія, МПК<sup>6</sup> В 23 К 009/095 В 23 К 009/09. Method and apparatus for electric arc welding [Text] / Stava E. K., Hsu C., Nicholson P.; Lincoln Global, Inc. №200155933 ; заявл. 24.07.2001 ; опубл. 21.11.2002.
- [3] Mazumder, J. Laser welding of steels in can making [Text] / J. Mazumder, W. Steen // Welding Journal. — 1981. — Vol. 60. — №6. — P. 19–25.
- [4] Tsubota, Sh. Application of Laser Arc Hybrid Welding to Shipbuilding [Text] / Sh. Tsubota, H. Koga // Journal of the Japan Welding Society. — 2010. — Vol. 79. — №7. — P. 7–10.

---

© Колектив авторів

Надійшла до редколегії 21.11.2012

Статтю рекомендує до друку член редколегії Вісника НУК  
д-р техн. наук, проф. В. Ф. Квасницький

Статтю розміщено у Віснику НУК №5, 2012

*Роботу виконано в рамках спільного проекту №Ф41/91-2012 фундаментальних досліджень Державного фонду фундаментальних досліджень України і Білоруського республіканського фонду фундаментальних досліджень («ДФФД – БРФФД–2011») на 2011–2012 роки «Дослідження закономірностей формування структури і властивостей зони лазерного впливу при гібридних процесах лазерного зварювання і наплавлення».*