

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИЗОВАНОГО ВИГОТОВЛЕННЯ СТАЛЕВИХ ФЕРМОВИХ ЗВАРНИХ КОНСТРУКЦІЙ

В.М. Коржик¹, А.А. Гринюк¹, В.Ю. Хаскін¹, Є.В. Ілляшенко¹, І.М. Клочков¹, Ганущак О.В.¹,
Yu Xuefen², Liuyi Huang²

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²Zhejiang Academy of Special Equipment Science. 310016, Jianggan District, Hangzhou, Zhejiang, 211, Kaixuan Road.

В роботі показано, що для підвищення продуктивності роботизованого виготовлення фрагментів сталевих фермових RHS (прямокутні порожнисті секції) конструкцій доцільно виготовляти заготовки прецизійним лазерним різанням із подальшою збіркою фрагментів точковими прихватками і шовним зварюванням дугою з плавким електродом із струмопровідним (гарячим) присаджувальним дротом. Лазерне різання із потужністю випромінювання ~1,0 кВт і піддувом стисненого повітря тиском 1,5 МПа дозволяє отримувати готові для подальшого зварювання елементи RHS конструкцій з точністю 0...0,1 мм. Встановлено, що у разі застосування зварювання дугою з плавким електродом із гарячим присаджувальним дротом швидкість підвищується в ~1,5 рази порівняно із звичайним зварюванням дугою з плавким електродом. Бібліогр. 13, рис. 6.

Ключові слова: лазерне різання, зварювання, дуга плавкого електрода, струмопровідний присаджувальний дріт, кутові з'єднання, вуглецева сталь, структури

Конструкційні переваги трубчастих сталевих елементів стають все більш очевидними в останні десятиліття завдяки дослідженням і досвіду в будівництві [1, 2]. У всьому світі ці елементи часто використовуються, особливо в конструкціях з великими прогонами. Наприклад, нещодавно в Німеччині була введена в експлуатацію перша повністю зварна трубчаста фермова конструкція моста без опор і з'єднань, яка є нововведенням в мостобудуванні як цілісна конструкція і прогресивною мостовою конструкцією в цілому [3]. Раніше фермові балки виготовляли з елементів кутового типу, з'єднаних у вузлах привареними косинками. В XXI столітті в промисловості з'явилися нові конструктивні рішення для фермових конструкцій, до яких в першу чергу відноситься використання елементів CHS (Circular Hollow Sections – круглого полого перерізу) і RHS (Rectangular Hollow Section – прямокутного полого перерізу), з'єднаних зварюванням безпосередньо в місцях стиків по контуру [4, 5].

Відомо, що елементи порожнистих конструкційних секцій (HSS – Hollow Structural Sections) мають багато переваг перед еквівалентними секціями з відкритим перетином, включаючи кращу стійкість до кручення, а також навантаження на розтяг та стиск, естетичний вигляд та економію з точки зору матеріальних витрат [5]. На перший погляд з'єднувати елементи HSS достатньо

просто, обрізавши кінці та зварюючи між собою. Однак, залежно від конфігурації спільного з'єднання та кількості підключених членів, це може призвести до отримання складних та дорогих конструкцій.

Для здешевлення і прискорення виготовлення таких конструкцій доцільно їх розбити на окремі вузли, що можуть бути зварені за допомогою промислових роботів [6]. У фактичному процесі будівництва фермових конструкцій елементи зазвичай зварюються точковим зварюванням на монтажній платформі, а потім зварюються цілком на роботизованих ділянках [7]. Але при цьому виникає низка проблем, пов'язаних із підготовкою і виконанням зварювання.

Для роботизованого зварювання необхідно чітко дотримання геометричних розмірів деталей, які підлягають зварюванню [8]. В першу чергу це стосується нерівномірних зазорів, які викликані неточністю підготовки, тобто різанням деталей під зварювання. Як правило, різання виконується механічним способом за допомогою пил. При цьому через зношення поверхні пил можуть змінюватися геометричні розміри деталей. Крім того, різання виконується переважно на напівавтоматичних станках, при цьому до проблем з точністю різання додається людський чинник. Ще однією проблемою є неможливість отримання різанням пилами криволінійних форм поверхонь різь. Че-

Коржик В.М. – <http://orcid.org/0000-0001-9106-8593>, Гринюк А.А. – <https://orcid.org/0000-0002-6088-7980>,
Хаскін В.Ю. – <http://orcid.org/0000-0003-3072-6761>, Ілляшенко Є.В. – <https://orcid.org/0000-0001-9876-0320>,
Клочков І.М. – <https://orcid.org/0000-0001-6490-8905>, Ганущак О.В. – <http://orcid.org/0000-0003-4392-6682>,
Yu Xuefen – <https://orcid.org/0000-0003-1922-1025>, Liuyi Huang – <https://orcid.org/0000-0003-4155-2824>

© В.М. Коржик, А.А. Гринюк, В.Ю. Хаскін, Є.В. Ілляшенко, І.М. Клочков, О.В. Ганущак, Yu Xuefen, Liuyi Huang, 2021

рез цю особливість у з'єднанні, яке збирають під зварювання, виникають зазори і воно не повністю відповідає вимогам оптимального (безщілинного) складання. Вирішенням цієї проблеми може бути або застосування певних технологічних прийомів, або додаткове фрезування для оптимального складання з'єднання перед зварюванням. В обох випадках продуктивність знижується, а вартість виконання робіт зростає.

Найбільш перспективними технологіями отримання заготовок з необхідною геометрією поверхні різа є лазерні [9]. Зокрема, досить розповсюджений процес лазерного різання із залученням промислових роботів [10]. Лазерний промінь на товщинах до 6 мм забезпечує тонкий (до 0,5 мм) різ. Це надає можливість значно зменшити витрати металу при розрізанні, оскільки ширина механічного CNC різку на товщині до 6 мм зазвичай становить до 5 мм [11]. Крім того, цінова доступність сучасного лазерного обладнання поступово наближується до станків CNC. У порівнянні із плазмовим різанням при лазерному витрачається менша кількість деталей робочого інструмента (в першу чергу ріжучих сопел), а також не потрібна фінішна обробка крайок для подальшого зварювання [10]. Застосування робота надає можливість виконувати різку за складними просторовими траєкторіями, які необхідні для отримання зварного з'єднання з позицій технологічності його виконання та міцності, а також сприяє гнучкості переходу від кутових з'єднань до стикових.

Для виготовлення сталевих конструкцій із труб CHS і RHS з використанням роботів більш доцільним і технологічним є спосіб імпульсно-дугового зварювання плавким електродом у

суміші газів (GMAW-P) [12]. Тим не менш даний спосіб зварювання має певні особливості, які не завжди позитивно впливають на процес зварювання. Одним із методів удосконалення процесу імпульсно-дугового зварювання плавким електродом є додаткове використання присаджувального дроту. Це надає можливість збільшити кількість металу в процесі зварювання без збільшення величини зварювального струму. Крім того, для збільшення ефективності формування зварного з'єднання при виконанні кутових швів доцільно використовувати додатковий присаджувальний дріт, підігрітий електричним різнополярним струмом [13]. Таке поєднання плавкого електрода та додаткового підігрітого дроту дає можливість певного збільшення швидкості зварювання кутових швів без збільшення сили струму дуги плавкого електрода, покращення геометрії поверхні швів за рахунок зменшення або повного усунення підрізів, зменшення деформації конструкції шляхом зменшення тепловкаладання при збереженні кількості металу, який залучається до формування шва. Крім того, такий підхід із застосуванням додаткового присаджувального дроту дозволить з мінімальними капітальними витратами удосконалити вже існуючі роботизовані комплекси зварювання плавким електродом.

Отже, для підвищення ефективності виготовлення фермових зварних конструкцій із труб CHS і RHS необхідно застосовувати комплексний підхід, який складатиметься із використанням роботизованого лазерного різання заготовок із сталевих профільних труб та роботизованого зварювання плавким електродом із додатковим підігрітим присаджувальним дротом.

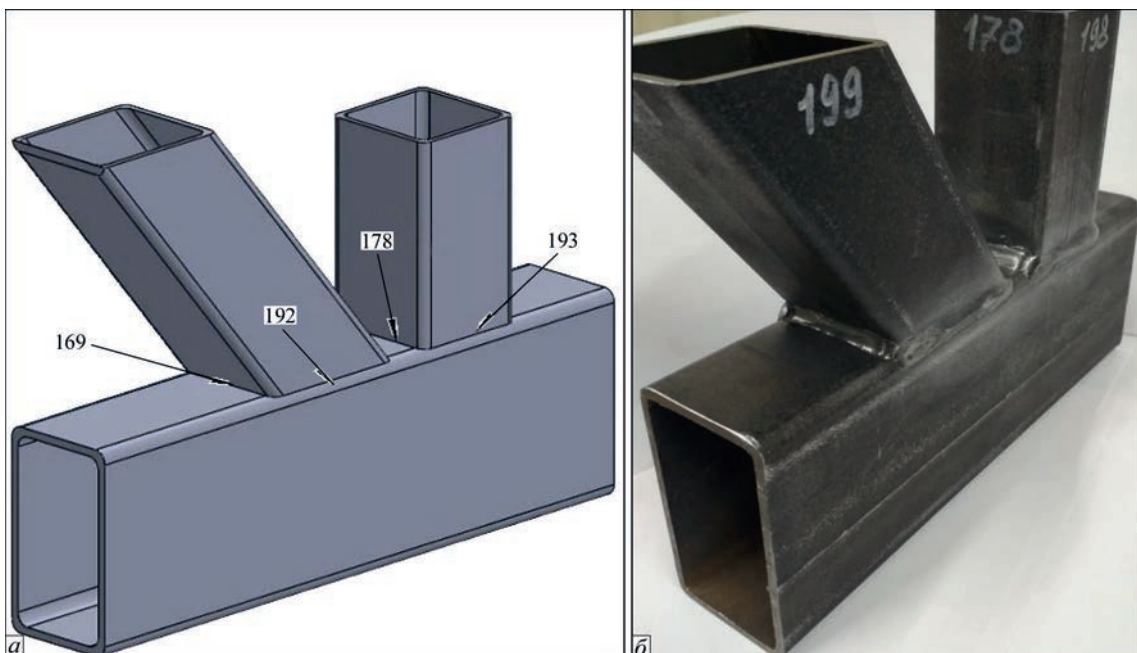


Рис. 1. Зовнішній вигляд вузла фермової конструкції з RHS елементів: а – модель із просторовим розміщенням зварних швів; б – зварений фрагмент

Метою роботи є підвищення ефективності роботизованого виготовлення фрагментів сталевих фермових конструкцій за рахунок застосування прецизійного лазерного різання заготовок із подальшими підготовкою і зварюванням дугою з плавким електродом.

Для досягнення даної мети вирішували наступні задачі: відпрацювання технології прецизійного лазерного різання вуглецевих сталей товщиною до 6 мм; підготовка порізаних заготовок до роботизованого зварювання дугою з плавким електродом; роботизоване зварювання дугою з плавким електродом, у тому числі із додатковим струмопровідним (гарячим) присаджувальним дротом.

Вузли фермових RHS конструкцій виготовляли з профільної труби розміром 60×60 та 120×60 мм з товщиною стінки до 6 мм (рис. 1). За допомогою лазерної різки з цієї труби виготовляли фрагменти довжиною 50...300 мм з прямими і скошеними торцями. Матеріал труби – вуглецева сталь Q235 (аналог сталі Ст3). Дана сталь не схильна до утворення гарячих та холодних тріщин під час GMAW зварювання, тому конструкція не потребує попереднього підігріву та контролю швидкості охолодження після зварювання. В експериментах зі зварювання використовували електродний і присаджувальний дроти марки ER-70S (аналог Св-08Г2С) діаметром 1,0...1,6 мм.

Для виконання технологічних досліджень було створено лабораторний роботизований комплекс (рис. 2), що включав волоконний лазер моделі MFSC-1000 (фірма MAX, КНР) потужністю до 1,0 кВт, промисловий робот Plazer R1 оригінальної розробки із вильотом руки до 1400 мм і вантажопідйомністю до 10 кг, джерело живлення GMAW моделі Fronius TPS 450, джерело живлення підігріву присаджувального дроту моделі EWM Tetrix 421 AC/DC, станцію газопідготовки, зварю-

вальні головки, зварювальний стіл, зварювальне-складальне оснащення тощо.

Необхідність застосування прецизійного лазерного різання була пов'язана з тим, що зазвичай при попередньому збиранні вузлів фермових конструкцій на заготівельній ділянці втрачався робочий час на ручну підгонку деталей, необхідність якої виникала через недотримання розмірів виготовлення деталей. Підвищення точності виготовлення деталей до $\pm 0,1$ мм усувало дану проблему.

За допомогою лазерної різальної головки власної розробки (рис. 2, б) було проведено низку експериментів з різання листів вуглецевої сталі, а також сталевих профільних труб (сталь типу Q235) із товщиною стінки $\delta \leq 6$ мм. Найкращі результати було отримано у разі використання стисненого повітря із тиском близько 1,5 МПа при заглибленні фокусу ~ 1 мм під поверхню матеріалу, що розрізають, та відстанню між цією поверхнею і зрізом ріжучого сопла не більше 1,0 мм. При потужності лазерного випромінювання близько 1,0 кВт швидкість різання зменшувалася від 240 до 60 м/год при збільшенні товщини листа від 2,0 до 6,0 мм. Ширина різа становила $\sim 0,3$ мм, крайки були достатньо гладкими, спостерігалася наявність незначного ґрату, який досить легко відділявся (рис. 3). З відповідних профільних труб було вирізано необхідну кількість деталей під подальше зварювання, при цьому точність їх виготовлення склала 0...0,1 мм, що задовільнило вимоги до попереднього збирання вузлів фермових конструкцій.

Наступним етапом було прискорення підготовки порізаних заготовок до роботизованого зварювання. Основною проблемою, що виникала на даному етапі, була втрата часу на процес складання конструкції, її притискання та розбирання притискних пристроїв на роботизованій зварювальній



Рис. 2. Зовнішній вигляд лабораторного роботизованого комплексу (а) і головка для лазерного різання (б) в руці робота

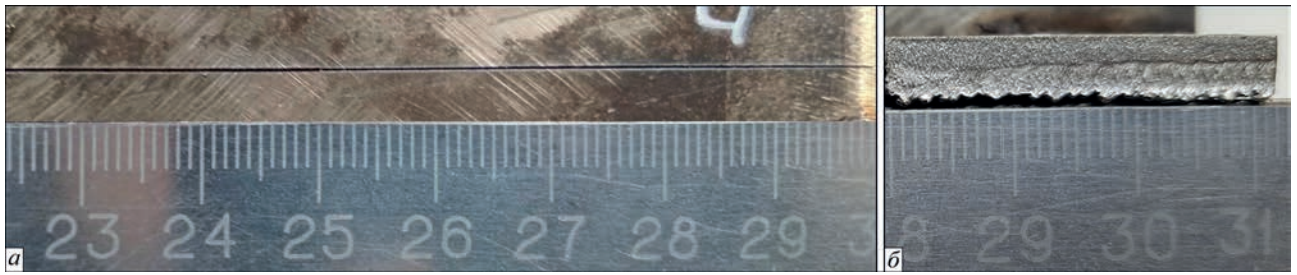


Рис. 3. Ширина (а) і крайка (б) лазерного різку профільної труби зі сталі типу Q235 (товщина стінки 5 мм)

ділянці через наявність в конструкції гвинтових притискачів. Для усунення цього недоліку було запропоновано на зварювальну роботизовану ділянку передавати вже попередньо складені за допомогою точкового зварювання елементи конструкції. З цією метою в ІЕЗ ім. Є.О. Патона розроблено проект ділянки складання під зварювання з універсальним зварювально-складальним оснащенням та відповідною технологією виконання складальних точкових швів. Для роботизованої зварювальної ділянки розроблено проект спрощеного оснащення для швидкої фіксації попередньо складеної під зварювання частини фермової конструкції. Підібрано такий тип притискних пристроїв, які забезпечують мінімальний час встановлення заготовки та її вивільнення після точкового зварювання.

Останньою задачею, яка вирішувалася в межах даної роботи, було роботизоване зварювання дугою з плавким електродом (GMAW). Перша важлива проблема, яка вирішувалася при цьому, була обумовлена наявністю радіуса закруглення в кутових зонах поверхні профільних труб, який призводив до утворення зазору (1,0...1,2 мм) при стикуванні відповідних елементів вузла фермової конструкції. Друга проблема була пов'язана із неможливістю виконувати зварювання на нормальних вильотах електродом (12...16 мм) через близьке розташування елементів конструкції та великого діаметра захисного сопла стандартного пальника, який не дозволяв забезпечити доступ на відстань 12...16 мм до зони зварювання (рис. 4, а). Третя проблема стосувалася потреби зварювання в різних просторових положеннях, оскільки

зварюваний фрагмент фермової конструкції був нерухомим, а GMAW-пальник в руці робота переміщувався із різними кутами нахилу за складною траєкторією.

Для усунення першої із вказаних проблем використали нахил осі пальника на кут 20° відносно умовної площини, яка проходить по осі стика перпендикулярно площині зварюваних деталей. З метою забезпечення виконання зварювання плавким електродом у важко доступних місцях із нормальним вильотом електродом (12...16 мм) було розроблено і застосовано модифікований пальник із звуженою сопловою частиною, яка здатна забезпечити виконання зварювання при відстані між боковими стінками порядку 13...14 мм (рис. 4, б). Для усунення третьої проблеми застосували адаптивне регулювання зварювального струму в залежності від напрямку просторового переміщення – у разі зварювання на підйом струм дещо зменшували, на спуск збільшували тощо. Така схема роботизованого зварювання актуальна для виготовлення фермових конструкцій із сталевих RHS труб, але більшою мірою – для конструкцій із CHS труб, оскільки у разі вварювання однієї круглої труби в іншу пальник необхідно переміщувати за сідлоподібною траєкторією.

За допомогою роботизованого експериментального комплексу проводилися технологічні дослідження зі зварювання заздалегідь порізаних лазерним способом елементів профільних труб зі сталі Q235 із товщиною стінки $\delta = 4$ мм в захисті газової суміші $82\% \text{Ar} + 18\% \text{CO}_2$. Зварюванням GMAW виконували стикові і таврові (кутові) з'єднання при витраті захисного газу близько

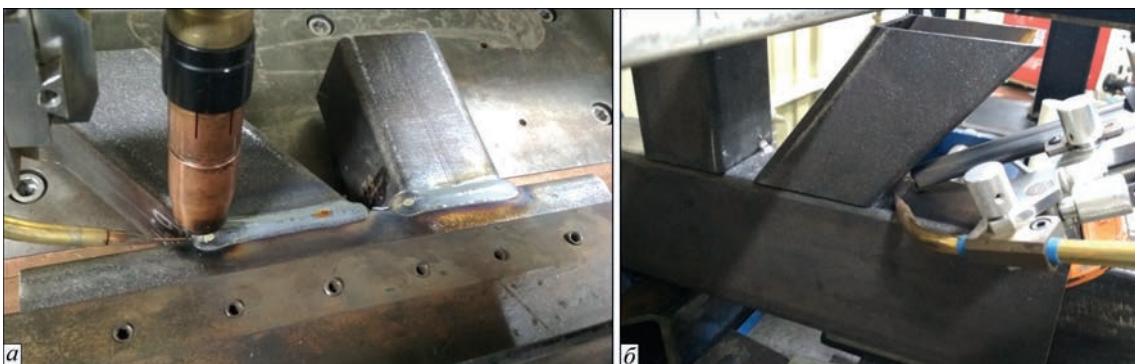


Рис. 4. Застосування стандартного пальника (а) і модифікованого пальника із звуженою сопловою частиною (б) для зварювання вузла фермової конструкції

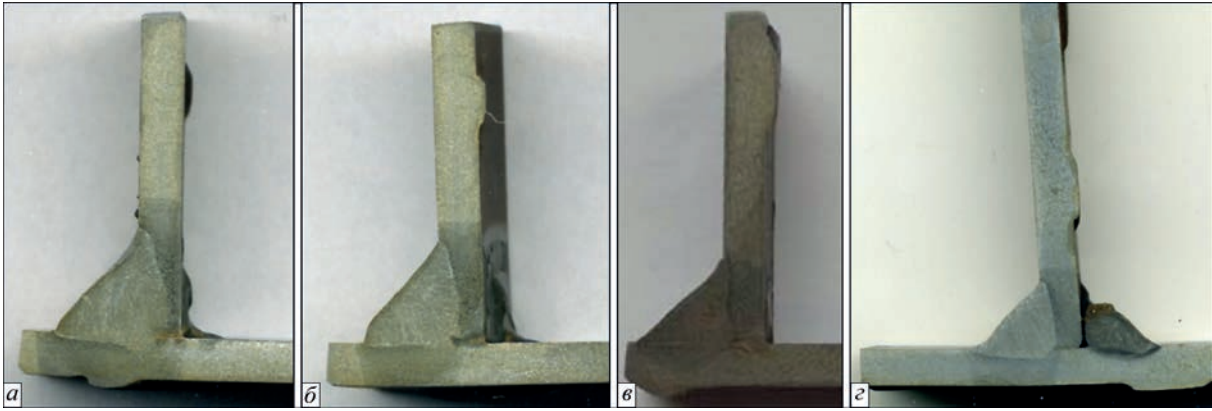


Рис. 5. Макроструктури зразків з поперечним перетином кутових швів (зліва), виконаних на зібраних на прихватках (справа) зразках зі сталі Q235 ($\delta = 4$ мм): а – GMAW без присадки; б, в – GMAW з холодною присадкою; з – GMAW з гарячою присадкою

20 л/хв. Дослідження проводили як для випадку звичайного GMAW, так і з додатковим присаджувальним дротом (рис. 4). Додатковий дріт подавали спереду назад у напрямку руху (зварювання) зі зміщенням щодо електрода вперед по ходу руху на відстань 2...5 мм. Дріт подавали як без, так і з підігрівом. При цьому для підігріву використовували як постійний, так і різнополярний струм. Постійний струм сприяв відхиленню зварювальної дуги і погіршував результат зварювання. Тому для підігріву додаткового присаджувального дроту використовували симетричні різнополярні імпульси із струмом $I_{HW} = 50 \dots 100$ А при напрузі $U_{HW} = 10 \dots 15$ В, електрична потужність лежала в межах від 500 до 1500 Вт при частотах від 75 до 100 Гц.

Спочатку було підібрано режим звичайного GMAW зварювання зі швидкістю 27...30 м/год за критерієм формування якісних швів без підрізів. Дослідження показали, що в цьому випадку проплавлення стінки зварюваних деталей становило порядку 50 % товщини (рис. 5, а). З метою збільшення продуктивності зварювання було збільшено швидкість на 40 % із одночасним збільшенням зварювального струму, але при цьому значно по-

гіршилося формування швів, з'явилися підрізи. Тому швидкість зменшили до початкової величини і водночас добавили присаджувальний дріт. При цьому формування швів стало задовільним, але зменшилося проплавлення (до 10...20 % від товщини стінки) і не збільшилася продуктивність (рис. 5, б). У разі спроби підвищити швидкість зварювання на 40...50 % спостерігалось несплавлення металу шва із основним металом (рис. 5, в). Введення підігріву присаджувального дроту посприяло формуванню якісних швів без підрізів із задовільною (не менш 30 %) глибиною провару стінки основного металу (рис. 5, з). При цьому швидкість зварювання збільшилася до 1,5 разів порівняно із звичайним GMAW зварюванням.

Аналіз одержаних з'єднань за такими показниками, як формування швів і їх міцність, показав, що звичайне GMAW зварювання і GMAW зварювання із додатковим струмопровідним (гарячим) дротом знаходяться приблизно на однаковому рівні. Проте, крім продуктивності, GMAW зварювання із гарячим дротом відрізняється зменшеним розбризкуванням і приблизно на 25 % меншою протяжністю зварювальної ванни (рис. 6).

Висновки:

1. Для підвищення продуктивності роботизованого виготовлення фрагментів фермових конструкцій із сталевих RHS труб запропоновано виготовлення заготовок прецизійним лазерним різанням із подальшою збіркою фрагментів точковими прихватками і шовним зварюванням дугою з плавким електродом із струмопровідним (гарячим) присаджувальним дротом.

2. Лазерне різання із потужністю випромінювання $\sim 1,0$ кВт і піддувом стисненого повітря тиском 1,5 МПа дозволяє отримувати готові для подальшого зварювання елементи RHS конструкцій з точністю 0...0,1 мм. При цьому стінки товщиною 2,0...6,0 мм розрізали зі швидкістю 240...60 м/год, а ширина різа становила $\sim 0,3$ мм.

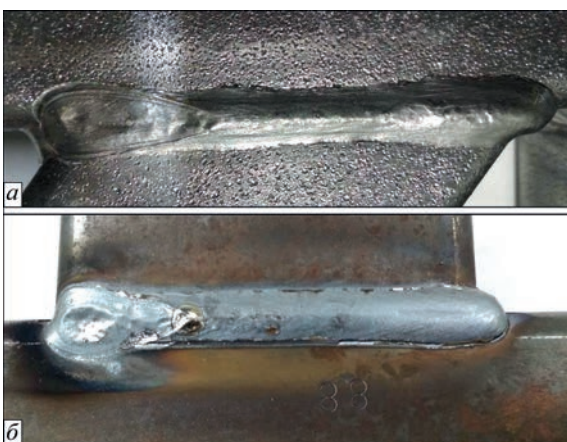


Рис. 6. Зовнішній вигляд швів, отриманих на зразках вузла фермової конструкції з RHS елементів (сталь Q235): а – звичайне GMAW; б – GMAW з гарячою присадкою

3. Для роботизованого виготовлення фермових конструкцій із сталевих CHS і RHS труб розроблена схема зварювання нерухомих фрагментів таких конструкцій пальником, що переміщується рукою робота в різних просторових положеннях, яка відрізняється адаптивним регулюванням струму зварювання залежно від просторового положення пальника із подачею гарячого присаджувального дроту спереду назад по ходу зварювання.

4. Для здійснення процесу зварювання дугою з плавким електродом із гарячим присаджувальним дротом створено спеціалізований пальник (звужене сопло), що забезпечує виконання зварювання у важкодоступних місцях із нормальним вильотом електрода (12...16 мм) при відстані між боковими стінками порядку 13...14 мм.

5. Встановлено, що у разі застосування зварювання дугою з плавким електродом із гарячим присаджувальним дротом швидкість підвищується в ~1,5 рази порівняно зі звичайним зварюванням дугою з плавким електродом. При цьому для підігріву дроту доцільно використовувати симетричні різнополярні імпульси струму потужністю 500...1500 Вт із частотою 75...100 Гц.

Список літератури/References

1. Radu, D., Radu, B. (2014) Truss beams welded joints strengthening solutions. 41th anniversary faculty of civil engineering subotica. *International Conference «Contemporary achievements in civil engineering», 24 April 2015*, Subotica, Serbia, pp. 261–269. DOI: <https://doi.org/10.14415/konferencijaGFS 2015.033>.
2. Патон Б.Е., Лобанов Л.М., Терещенко В.И. и др. (1994) Роботизированное производство сварных ферм для перекрытий промышленных зданий. *Автоматическая сварка*, **12**, 26–29.
Paton, B.E., Lobanov, L.M., Tereshchenko, V.I. et al. (1994) Robotic production of welded trusses for industrial building overlaps. *Автоматич. Сварка*, **12**, 26–29 [in Russian].
3. Casper, H.-J. (2014) The First Fully Welded Integral Tube-Truss Bridge of Germany. Petzek E., Bancila R. (Eds) *The Eight International Conference «Bridges in Danube Basin»*. Springer Vieweg, Wiesbaden, pp. 163–172. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-658-03714-7_11.
4. Radu, D., Galatanu, T. (2016) Optimization solutions for truss beams elements welded joints. *4th International Conference «Contemporary achievements in civil engineering», 22 April 2016*, Subotica, Serbia, pp. 105–111. DOI: <https://doi.org/10.14415/konferencijaGFS 2016.009>.
5. Zhao, X.L., Tong, L.W. (2011) New Development in Steel Tubular Joints. *Advances in Structural Engineering*, **14**, 4, 699–715. DOI: <https://doi.org/10.1260/1369-4332.14.4.699>.
6. Cheav Por Chea, Yu Bai, Xuebei Pan et al. (2020) An integrated review of automation and robotic technologies for structural prefabrication and construction. *Transportation Safety and Environment*, **2**, 2, 81–96. DOI: <https://doi.org/10.1093/tse/tdaa007>.
7. Yang, W., Lin, J., Gao, N., Yan, R. (2018) Experimental Study on the Static Behavior of Reinforced Warren Circular Hollow Section (CHS) Tubular Trusses. *Appl. Sci*, **8**(11), 2237, 1–22. DOI: <https://doi.org/10.3390/app8112237>.
8. Grinyuk, A.A., Korzhik, V.N., Shevchenko, V.E. et al. (2015) Main tendencies in development of plasma-arc welding of aluminium alloys. *The Paton Welding J.*, **11**, 31–41. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2015.11.04>.
9. Korzyk, V., Khaskin, V., Perepychay, A. et al. (2020) Forecasting the results of hybrid laser-plasma cutting of carbon steel. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, **2**(104), 6–15. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.198433>.
10. Kumar, H., Ganesh, P., Kaul, R. et al. (2006) Laser welding of 3 mm thick laser-cut AISI 304 stainless steel sheet. *J. of Materi Eng and Perform*, **15**, 23–31. DOI: <https://doi.org/10.1361/105994906X83385>.
11. Chuangwen, Xu, Jianming, Dou, Yuzhen, Chai et al. (2018) The relationships between cutting parameters, tool wear, cutting force and vibration depth can improve productivity and control cutting force and vibration. *Advances in Mechanical Engineering*, **10**(1), 1–14. DOI: <https://doi.org/10.1177/1687814017750434>.
12. Praveen, P., Yarlagadda, P.K.D.V., Kang, M.J. (2005) Advancements in pulse gas metal arc welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 164–165, 1113–1119. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.02.100>.
13. Spaniol, E., Trautmann, M., Ungethüm, T. et al. (2020) Development of a highly productive GMAW hot wire process using a two-dimensional arc deflection. *Weld World*, **64**, 873–883. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40194-020-00880-9>.

IMPROVING THE EFFICIENCY OF ROBOTIC FABRICATION OF STEEL TRUSS WELDED STRUCTURES

V.M. Korzyk¹, A.A. Grynyuk¹, V.Yu. Khaskin¹, Ye.V. Illiashenko¹, I.M. Klochkov¹, O.V. Ganushchak, Yu Xuefen², Liuyi Huang²

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.
E-mail: office@paton.kiev.ua

²Zhejiang Academy of Special Equipment Science. 310016, Jianggan District, Hangzhou, Zhejiang, 211, Kaixuan Road.

It is shown that to increase the productivity of robotic fabrication of fragments of steel truss RHS (Rectangular Hollow Section) structures it is advisable to make workpieces by precision laser cutting with subsequent assembly of fragments by point tack and consumable-arc seam welding with current-carrying (hot) filler wire. Laser cutting with radiation power of ~1.0 kW and compressed air blowing at the pressure of 1.5 MPa allows obtaining ready for further welding elements of RHS structures with the accuracy of 0...0.1 mm. It is established that in the case of application of consumable-arc welding with hot filler wire, the speed increases by ~1.5 times compared to conventional consumable-arc welding 13 Ref., 6 Fig.

Key words: laser cutting, welding, consumable electrode arc, current-carrying filler wire, angle joints, carbon steel, structures

Надійшла до редакції 26.04.2021