DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-26-254-8-3

ОГЛЯД НАУКОВИХ ПРАЦЬ, ПРИСВЯЧЕНИХ ДОСЛІДЖЕННЮ ВПЛИВУ СКЛАДОВИХ ПРОЦЕСІВ ЛАЗЕРНОГО ТА ГІБРИДНОГО ЛАЗЕРНО-ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ НА ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ ТА РІВЕНЬ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ

Бернацький А. В.

ВСТУП

Потреба промисловості в підвищенні якості зварних швів і продуктивності процесу зварювання просторових складно профільних конструкцій з низьколегованих та вуглецевих сталей постійно стимулює вдосконалення існуючих технологій зварювання та розробку нових технологій. Продовж останніх десяти років стали доступними твердотільні та волоконні лазери, які дозволяють без короблення зварювати в один шар листи із низьколегованих та вуглецевих конструкційних сталей з товщиною стінки до 10 мм та більше, з високою швидкістю зварювання (на рівні 2 м/хв). Ці лазери забезпечують потужність випромінювання до декількох десятків кіловат в поєднанні з дуже високою якістю пучка (ВРР 8 мм×мрад до 11 мм×мрад), у порівнянні зі звичайними системами (CO_2, Nd:YAG) високий електричний ККД (25-30 %)[1]. Це дозволило внести значний вклад у підвищення продуктивності виробництва товстостінних конструкцій[2], звести до мінімуму додаткову обробку[3] та відкрити нові перспективи для різних галузей, де використовуються зварювання, і в яких до цього часу не знайшло своє застосування лазерне зварювання. Ці лазери на сьогоднішній день знайшли своє

[1] Razab M. K. A. A., Jaafar M. S., Abdullah N. H., Suhaimi F. M., Mohamed, M., Adam N., Yusuf N. A. A. N. A review of incorporating Nd: YAG laser cleaning principal in automotive industry. Journal of radiation research and applied sciences. 2018. Vol. 11. № 4. C. 393-402.

[2] Paul C., Zimmermann G. MSG-Laserstrahl-Hybridschweißen in der industriellen Anwendung bei dicken Blechstärken. In Proceedings: 8. Internationale Konferenz Strahltechnik. Halle. 2010, April.

[3] Kelly S. M., Brown S. W., Tressler J. F., Martukanitz R. P., Ludwig, M. J. Using hybrid laser-arc welding to reduce distortion in ship panels. 2009. Welding Journal. Vol. 88. Iss. 3. P. 32-36.

застосування у виробництвах, які вже мають досвід роботи із лазерним зварюванням високоміцних сталей, наприклад у суднобудуванні[4]. Загальновідомі переваги процесу лазерного зварювання: висока продуктивність за рахунок високої швидкості зварювання, низький рівень поводок за рахунок низького концентрованого введення енергії і високої глибини проникнення проявляються при одношаровому зварюванні товстих листів. За допомогою джерел випромінювання, які були наявні до 2000 рр., із низькою потужністю, або високою потужністю, поганою якістю пучка, цього не можна було б виконати.

Проте, існують проблеми при лазерному зварюванні низьколегованих та вуглецевих конструкційних сталей товщиною порядку 10 мм. Так, наприклад, зустрічається утворення кристалізаційних тріщин в зварних з'єднаннях сталей, коли властивості матеріалу, технологічні параметри та механічні характеристики неузгоджені[5]. Це перешкоджає поширенню методів у інших галузях промисловості. Кристалізаційні тріщини утворюються протягом плавлення і росту сітки дендритів. Причина їх виникнення поки недостатньо зрозуміла[6]. Проте, відомо, що на них впливає складна взаємодія хімії матеріалів, теплового режиму та механічних граничних умов (стійкість до зовнішнього натягу, міцність матеріалу, товщини стінки, яка використовувалась, прихватки, вплив сил попереднього натягу, тощо)[7]. Зокрема, є незрозумілим вплив останнього чинника.

Іншою значною перешкодою поширенню методів лазерного зварювання низьколегованих та вуглецевих конструкційних сталей у різних галузях промисловості, являються високі інвестиції у промислове лазерне обладнання. Не вигідним для промислового застосування є високі витрати на обладнання, а також інвестиції в

[4] Panchuk M., Sładkowski A., Panchuk A., Semianyk I. New technologies for hull assemblies in shipbuilding. NAŠE MORE: znanstveni časopis za more i pomorstvo. 2021. Vol. 68. Iss. 1. P. 48-57.

[5] Schmid D., Stanton N. A. How are laser attacks encountered in commercial aviation? A hazard analysis based on systems theory. Safety science. 2018. Vol. 110. P. 178-191.

[6] Pozniakov V., Markashova L., Berdnikova O. M., Alekseienko T., Zhdanov S. Structure and crack resistance of NA-XTRA-70 steel joints manufactured by hybrid laser-arc welding. Materials Science Forum. Vol. 2018927. P. 29-34.

[7] Artinov A., Bachmann M., Meng X., Karkhin V., Rethmeier M. On the relationship between the bulge effect and the hot cracking formation during deep penetration laser beam welding. Procedia CIRP. 2020. Vol. 94. P. 5-10.

лазерну безпеку, відповідно до EN-60825-1[8]. Значно проблематичним є те, що це при лазерному зварюванні необхідно витримувати невеликі зазори у дуже вузькому полі допуску. В тонких листових заготовках це часто можна обійти шляхом зварювання в напустку. Цього не можна зробити в найбільшій мірі в області листових металів з товщиною стінки біля 10 мм. В результаті, це потребує дорогих та масивних затискних конструкцій.

1. Огляд наукових праць, присвячених дослідженню впливу складових процесів лазерного та гібридного лазерно-дугового зварювання на формування структури та рівень механічних характеристик зварних з'єднань високоміцних сталей

Американський виробник самоскидів Edbro PLC одним з перших застосував на початку цього тисячоліття лазерну установку для зварювання телескопічних гідроциліндрів з низьколегованих сталей[9]. Із використанням автоматичної CO_2-лазерної установки потужністю 6 кВт, був сильно скорочений як час обробки, так і остаточна обробка в порівнянні з процесом зварювання тертям, який використовувався раніше. Особливо вигідною є гнучкість інструменту. За допомогою нового процесу час для зміни на інший для оброблюваного діаметру був зменшений з 2,5 годин до 15 хвилин. Хоча у цій роботі вказувався діапазон товщин стінок між 11 мм та 30 мм при зовнішньому діаметрі між 460 мм та 2600 мм, Гуменюк та Ретмайер у роботі[10] відзначали, що лазерне зварювання доречно для товщин не більше 10 мм, за наявної необхідної потужності лазерного випромінювання. Решта може бути заповнена шляхом дугового або гібридного лазерно-дугового зварювання[11].

На протязі останніх двадцяти років ведуться роботи із використання лазерного[12] та гібридного лазерно-дугового

[8] Neyezhmakov P., Tymofeiev E., Lyashenko O. Automation of dosimetric control for laser radiation. Metrology and instruments. 2018. Iss. 6. P. 28-35.

[9] The rise and rise (telescopically) of laser welding. Welding and Metal Fabrication. 1999. Vol. 67. Iss. 6. P. 11–12.

[10] Gumenyuk A., Rethmeier M. Laser-MSG-Hybridschweißen von dickwandigen präzisionsrohren. Schlussbericht. Förderkennzeichen AiF. 2007. P. 15917.

[11] Кривцун И. В., Хаскин В. Ю., Коржик В. Н., Ло Ц. Промышленное применение гибридной лазерно-дуговой сварки (Обзор). Автоматическая сварка. 2015. № 7. С. 44-50.

[12] Панчук М. В., Шлапак Л. С., Матвієнків О. М., Козак О. Л. Сучасні технології зварювання магістральних нафтогазопроводів. Scientific Bulletin of Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas. 2011. № 3(29). С. 24-29.

зварювання[13] для виробництва трубопроводів з низьколегованих сталей за допомогою CO_2-лазерів. Пізніше слідували роботи по використанню Nd:YAG[14] та волоконного лазерів[15]. Основною задачею при використанні є виконання променевого процесу зі своїми специфічними вимогами до підготовки шва: в області виробництва труб та зварювання неповоротних стиків трубопроводів. Якщо зварюються радіальні шви трубопроводів лазерним зварюванням[16], то трубопровід через свою загальну довжину та вагу не може змінити позицію. Процес повинен пристосовуватись під час обробки до зміни просторового положення під час зварювання[17]. Перші обнадійливі результати для одношарових швів були проведені у роботі[18]. Автори зварювали короткі сегменти трубопроводу (діаметром 914,4 мм) з товщиною стінки 16 мм із сталі X65, використовуючи волоконний лазер YLR-20000 з максимальною потужністю 20 кВт у двох напівобертальних процесах. При цьому була досягнута прийнятна якість шва при використанні оптичного сканера лазерного випромінювання. Тим не менш, не вдалося уникнути проростання кореня із внутрішньої сторони шва, що необхідно при односторонньому доступу та відповідає випадку застосування й волоконного лазеру[19].

---

[13] Шелягин В. Д., Хаскин В. Ю., Бернацкий А. В., Сиора А. В. Перспективы применения лазерной и гибридной технологий сварки сталей для повышения эксплуатационного ресурса трубопроводов. Автоматическая сварка. 2010. № 10. С. 37-40.

[14] Пилярчик Я., Банасик М., Дворак Д., Стано С. Лазерные установки в современных сварочных технологиях. Исследование и применение. Автоматическая сварка. 2008. № 11. С. 88-92.

[15] Ушаков А. Б., Морозова О. П., Бегунов И. А., Шамов Е. М., Орешкин А. А., Вышемирский Е. М. Технология лазерной сварки магистральных трубопроводов. Газовая промышленность. 2017. № S2(754). С. 100-107.

[16] Thomy C., Seefeld T., Vollertsen F., Vietz E. Application of fiber lasers to pipeline girth welding. Welding journal. 2006. Vol. 85. Iss. 7. P. 30-33.

[17] Туричин Г. А., Цибульский И. А., Кузнецов М. В., Ахметов А. Д. Лазерно-дуговая сварка в различных пространственных положениях. Материаловедение. Энергетика. 2013 Том 4-1. № 183. С. 218-225.

[18] Gook S., Gumenyuk A., Rethmeier, M. Weld seam formation and mechanical properties of girth welds performed with laser-GMA-hybrid process on pipes of grade X65. In International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics 2010. Vol. 2010, No. 1. P. 62-69.

[19] Thomy C., Seefeld T., Vollertsen F., Vietz E. Application of fiber lasers to pipeline girth welding. Welding journal. 2006. Vol. 85. Iss. 7. P. 30-33.

Випробування, які наведені в роботах[20,21] з високоміцною сталлю Optim 960QC проводили з використанням кількох процесів зварювання: дугового зварювання, лазерного, і гібридного лазерно-дугового зварювання. Були використані лазерні джерела живлення, такі як CO_2-лазер, твердотільний дисковий лазер і волоконний лазер. При випробуваннях були використані стикові з'єднання з різною канавковою геометрією, а товщина матеріалу основи була постійною 6 мм. В якості зварювальних матеріалів використовували дроти суцільного перерізу: Union x96 (ISO 14341: G 89 5 M Mn4Ni2.5CrMo) ESAB OK 12.50 (G3Si1). Діаметр присадного дроту варіювався від 1,0 до 1,2 мм. Найбільші значення твердості (HV 400), були отримані для лазерних зварних швів. Згідно результатів міцність з'єднань відповідає номінальній міцності основного матеріалу (межа міцності при розтягуванні 960 МПа), незалежно від способу зварювання і використаного зварювального матеріалу. Як й очікувалося, результати випробувань на статичний згин були незадовільними, особливо, коли вигин використовували з лицьового боку швів.

Автори[22] стверджують, що статичний згин, а також випробування на ударну в'язкість зразків з гострим надрізом не є кращими методами оцінки пластичності або ударної в'язкості зварного шва для високоміцних сталей. Проте, задовільного значення ударної в'язкості, були досягнуті на лінії сплавлення зварних з'єднань при лазерному зварюванні до 57 Дж і 49 Дж при гібридному лазерно-дуговому зварюванні, за умов використання відповідного присаджувального матеріалу G3Si1.

Знеміцнення у ЗТВ є однією з головних проблем при лазерному зварюванні низьколегованих та вуглецевих конструкційних сталей і характеризується двома показниками: шириною зони знеміцнення і

[20] Laitinen R., Kömi J., Keskitalo M., Mäkikangas J. Improvement of the strength of welded joints in ultra high strength Optim 960 QC using autogenous Yb:YAG laser welding. In Proceedings of 11th Nolamp Conference (pp. 204-214). 2007. Lappeenranta: Finland.

[21] Laitinen R., Lehtinen M., Kujanpää V. Fellman A. Influence of laser and hybrid laser-MAG (hybrid) welding on the strength and toughness of the weld HAZ of ultra high strength steel optim RAEX 960 QC. In 10th Nordic Laser Materials Processing Conference, NOLAMP 10. 2005. Luleå University of Technology: Finland.

[22] Siltanen J., Tihinen S., Kömi J. Laser and laser gas-metal-arc hybrid welding of 960 MPa direct-quenched structural steel in a butt joint configuration. Journal of Laser Applications. 2015. Vol. 27. Iss. S2. P. S29007.

мінімальною твердістю знеміцненої зони[23]. Твердість металу ЗТВ поступається твердості основного металу за рахунок формування в ньому певної мікроструктури. Дослідження[24] по лазерному зварюванню низьколегованої високоміцної сталі DP980 показали, що м'яка зона значно знижує опір втомі і формування зварного з'єднання. Зниження службових властивостей металу ЗТВ є комплексним явищем і залежить від кількості вмісту мартенситу в мікроструктурі, хімічного складу сталі, підводу тепла під час процесу зварювання. Перепад величини твердості в ЗТВ є пропорційним вмісту в сталі мартенситу, тому що кількість тепла, необхідного для утворення зони знеміцнення знижується, коли вміст мартенситу збільшується.

Застосування лазерного зварювання в порівнянні з дуговим зварюванням в захисних газах веде до нешироких, без розтягуючих напружень зварних з'єднань, в наслідок утворення глибокої і паралельної форми провару з малою шириною та усадкою. Однак, лазерне зварювання піддає метал швидкому нагріву і охолодженню, а також теплової деформації, що, як стверджують автори[25], зумовлює зниження опору утворенню гарячих тріщин зварних з'єднань.

Метою використання присадного матеріалу при лазерному зварюванні є уникнення ослаблення шва при підготовці зварного з'єднання (початкове закріплення) та досягнення необхідних механічних властивостей основного металу за допомогою металургійних ефектів від додавання присадного матеріалу Перевага такої технології в тому, що одношарові з'єднання отримують для великих товщин вище 20 мм із низькою погонною енергією[26]. Однак, недоліком є втрата потужності лазерного випромінювання, яка необхідна для розплавлення дроту. Тому максимальна глибина проникнення є меншою, в порівнянні з процесом лазерного зварювання, без присадного матеріалу. Для плавлення одного дротового електроду з

[23] Salminen A., Farrokhi F., Unt A., Poutiainen I. Effect of optical parameters on fiber laser welding of ultrahigh strength steels and weld mechanical properties at subzero temperatures. Journal of Laser Applications. 2016. Vol. 28. Iss. 2. P. 022415.

[24] Xu W., Westerbaan D., Nayak S. S., Chen D. L., Goodwin F., Zhou Y. Tensile and fatigue properties of fiber laser welded high strength low alloy and DP980 dual-phase steel joints. Materials & Design. 2013. Vol. 43. P. 373-383.

[25] Salminen A., Farrokhi F., Unt A., Poutiainen I. Effect of optical parameters on fiber laser welding of ultrahigh strength steels and weld mechanical properties at subzero temperatures. Journal of Laser Applications. 2016. Vol. 28. Iss. 2. P. 022415.

[26] Katayama S. Industrial applications of laser or hybrid welding. In Fundamentals and Details of Laser Welding (pp. 185-198). 2020. Springer, Singapore.

діаметром від 1,2 мм потрібна номінальна потужність лазерного випромінювання у 2 кВт при швидкості подачі дроту від 10 м/хв[27]. Для тонких листів низьколегованих та вуглецевих конструкційних сталей, при використанні присадного матеріалу, втрати лазерного випромінювання на його плавлення складають від 10% до 30%[28].

У всьому зварному шві бажане однорідне перемішування основного матеріалу із присадним матеріалом, щоб зменшити ризик утворення тріщини в основному металі і корені шва. Тому потрібна особлива підготовка з'єднання із зазором. При таких умовах збільшення потужності лазера може привезти до дефектів, пор та включень у зварному шві. Тому для підвищення стабільності процесу потрібно зменшувати швидкості зварювання. Як показали дослідження з високопотужними лазерами (вище 10 кВт), є обмеження по максимально допустимій швидкості лазерного[29] та гібридного лазерно-дугового зварювання[30] для отримання стабільного процесу і з'єднань без пор. З урахуванням оптимізації всіх параметрів процесу та геометрії з'єднання, очевидним стає вплив присадного дроту, як фактору що впливає на втрату швидкості процесу зварювання та підвищує стабільність процесу.

Очевидно, використання лазерного зварювання з присадним дротом з металургічної точки зору призводить до покращення механічно-технологічних властивостей зварного шва[31]. Однак, може мати місце ефект неповного проварювання, так як відносно велика частина потужності лазерного випромінювання витрачається для плавлення присадного дроту. При однакових умовах максимальні швидкості зварювання у порівнянні із лазерним зварюванням без

[27] Райзген У., Ольшок С. Гибридная лазерно-дуговая сварка под флюсом. Автоматическая сварка. 2009. № 4. С. 46-51.

[28] Шелягин В. Д., Хаскин В. Ю., Бернацкий А. В., Сиора А. В. Перспективы применения лазерной и гибридной технологий сварки сталей для повышения эксплуатационного ресурса трубопроводов. Автоматическая сварка. 2010. № 10. С. 37-40.

[29] 2Salminen A., Farrokhi F., Unt A., Poutiainen I. Effect of optical parameters on fiber laser welding of ultrahigh strength steels and weld mechanical properties at subzero temperatures. Journal of Laser Applications. 2016. Vol. 28. Iss. 2. P. 022415.

[30] Unt A., Poutiainen I., Grünenwald S., Sokolov M., Salminen A. High power fiber laser welding of single sided T-joint on shipbuilding steel with different processing setups. Applied Sciences. 2017. Vol. 7. Iss. 12. P. 1276.

[31] Zhang K., Li D., Gui H., Li Z. Adaptive control for laser welding with filler wire of marine high strength steel with tight butt joints for large structures. Journal of Manufacturing Processes. 2018. Vol. 36. P. 434-441.

присадного матеріалу є меншими і це є економічним недоліком. На противагу цьому, додана потужність дуги при гібридному лазерно-дуговому зварюванні у зварювальній ванні не залежить від кількості присадних матеріалів. Так, як потужність плавлення та швидкість зварювання можуть змінюватись, незалежно один від одного, що може забезпечити одночасно економічні та металургійні ефекти.

Процес лазерно-дугового зварювання може здійснюватися як неплавким[32], так і плавким електродом[33]. При використанні неплавкого електроду дуга запалюється попереду по ходу зварювання. Дуга підігріває метал і розплавляє його верхній шар, а лазерний – здійснює глибоке проплавлення[34]. При використанні плавкого електрода електричну дугу запалюють позаду сфокусованого випромінювання, яке проплавляє тільки дотичні частини металу, наприклад, з V-подібною розробкою кромок, а заплавлення скосу кромок здійснюється електричною дугою плавким електродом[35].

При гібридному зварюванні крім лазерного випромінювання на зварювальну ванну впливає зварювальна дуга, яка є додатковим джерелом енергії, що вводиться в зварювальну ванну. Це дозволяє використовувати лазери більш низької потужності для отримання необхідної глибини проплавлення. Крім того, використання зварювальної дуги, що є менш сфокусованим джерелом тепла, дозволяє виконувати зварювання з більшим зазором між кромками, що зварюються (для лазерного зварювання максимально допустимим є зазор в 0,1 мм, гібридне зварювання дозволяє зварювати кромки, що мають зазор від 0 до 1,5 мм) [36].

Слід зауважити, що при лазерно-дуговому зварюванні електричні параметри дуги визначаються не тільки процесами, що відбуваються

---

[32] Кривцун И. В., Крикент И. В., Демченко В. Ф., Райсген У., Забиров А. Ф., Мокров О. А. Взаимодействие излучения CO_2-лазера с плазмой аргоновой дуги при гибридной (лазер+ ТИГ) сварке. Автоматическая сварка. 2015. № 3-4. С. 7-16.

[33] Ках П., Салминен А., Мартикаинен Д. Особенности применения гибридной лазерно-дуговой сварки (Обзор). Автоматическая сварка. 2010. № 6. С. 38-47.

[34] Кривцун И. В., Крикент И. В., Демченко В. Ф., Райсген У., Забиров А. Ф., Мокров О. А. Взаимодействие излучения CO_2-лазера с плазмой аргоновой дуги при гибридной (лазер+ ТИГ) сварке. Автоматическая сварка. 2015. № 3-4. С. 7-16.

[35] Gumenyuk A., Rethmeier M. Laser-MSG-Hybridschweißen von dickwandigen präzisionsrohren. Schlussbericht. Förderkennzeichen AiF. 2007. P. 15917.

[36] Туричин Г. А., Цибульский И. А., Валдайцева Е. А., Лопота А. В. Гибридная лазерно-дуговая сварка металлов больших толщин. Сварка и диагностика. 2009. № 3. С.16-23.

в дузі, але і явищами, що виникають при лазерному впливі на метал. При лазерно-дуговому зварюванні металів напруга на дузі нижча, ніж напруга при дуговому зварюванні.

На даний час достатньо добре досліджено вплив термічних циклів на утворення структури в металі ЗТВ з'єднань низьколегованих високоміцних конструкційних сталей, виконаних дуговим зварюванням[37]. Але перенести результати таких досліджень на лазерне зварювання неможливо, тому що при лазерному зварюванні мають місце високі градієнти температури і швидкості охолодження металу. Це вносить особливості в кристалізацію розплаву і формування в закристалізованому металі структури, яка, як зазначається авторами[38], має відносно невелику в'язкість. Зі збільшенням міцності конструкційних сталей умови, за яких можуть бути отримані якісні з'єднання при лазерному зварюванні значно обмежуються та суттєво відрізняються від дугового зварювання плавким електродом.

Процеси зварювання із високою концентрацією щільності потужності, таке як, лазерне зварювання, мають високі швидкості охолодження і, отже, низьку в'язкість в шві і металі ЗТВ зварних з'єднань. Для подолання цієї проблеми, потрібно спрямовано впливати на метал зварних з'єднань через присадний матеріал, що може бути реалізовано за рахунок використання гібридного лазерно-дугового зварювання[39].

Вплив гібридного лазерно-дугового зварювання на механічні властивості та формування напружено-деформованого стану в зварних з'єднаннях високоміцних низьколегованих (HSLA) сталей

[37] Poznyakov V. D., Markashova L. I., Shelyagin V. D., Zhdanov S. L., Bernats'kyi A. V., Berdnikova O. M., Sydorets V. M. Cold cracking resistance of butt joints in high-strength steels with different welding techniques. Strength of Materials. 2019. Vol. 51. Iss. 6. P. 843-851.

[38] Turichin G., Kuznetsov M., Tsibulskiy I., Firsova A. Hybrid laser-arc welding of the high-strength shipbuilding steels: equipment and technology. Physics Procedia. 2017. Vol. 89. P. 156-163.

[39] Berdnikova O., Pozniako, V., Bushma O. Laser and hybrid laser-arc welding of high strength steel NA-XTRA-70. Materials Science Forum. 2016. Vol. 870. P. 630-635.

розглянуто в роботах[40,41]. Дані сталі були розроблені з метою усунути попередній підігрів при зварюванні. Ці сталі знаходять своє застосування в кораблебудуванні та мають підвищену міцність за рахунок добавки легуючих елементів які забезпечують дисперсійне зміцнення (HSLA-80, HSLA-100) або шляхом термомеханічної обробки (HSLA-65). Сталь HLSA-65 має межу текучості 445 МПа і виготовляється шляхом термомеханічної контрольованої прокатки. Її властивості залежать від подрібнення зерна отриманого при гарячій обробці. При зварюванні з великим тепловкладенням в такій сталі є ризик зростання зерна в ЗТВ, що може сприяти локальному знеміцненню. Шляхом вирішення даної проблеми є застосування лазерного зварювання, яке характеризується низьким рівнем тепловкладення і високою глибиною проплавлення. Однак недоліками даного методу є необхідність наявності мінімального зазору між деталями, що зварюються. Вирішити цю проблему можна з застосуванням гібридного лазерно-дугового.

2. Огляд наукових праць, присвячених дослідженню впливу складових процесів лазерного та гібридного лазерно-дугового зварювання на формування структури та рівень механічних характеристик зварних з'єднань з трубних сталей

До задач зварювання трубних сталей великих товщин відносяться як питання виготовлення труб магістральних трубопроводів, так і задачі їх монтажу. Якщо перший момент пов'язаний із значними швидкостями зварювання і підвищенням продуктивності процесу, то другий – в першу чергу із підвищенням якості з'єднань. Для вирішення вказаних задач не завжди оптимальним є застосування дугового зварювання – або через велике вкладання погонної енергії (багатодугове зварювання), або через малі швидкості процесу (багатопрохідне зварювання). В усіх випадках дугове зварювання характеризується потребою у механічній розробці крайок на кути порядку 30…60°, яку при зварюванні потрібно заповнювати, значним перегрівом основного металу, великим розміром зварювальної ванни і ЗТВ, наявністю небажаних залишкових деформацій, збільшенням

[40] Cao X., Wanjara P., Huang J., Munro C., Nolting A. Hybrid fiber laser-arc welding of thick section high strength low alloy steel. Materials & Design. 2011. Vol. 32. Iss. 6. P. 3399-3413.

[41] Nolting A. E., Munro C., Cao X. J., Wanjara P. Mechanical properties of HSLA-65 hybrid laser arc welds. Canadian Metallurgical Quarterly. 2012. Vol. 51. Iss. 3. P. 336-345.

розміру зерен структур литого металу і металу ЗТВ. Все це негативно впливає на якість і довговічність з'єднань.

В даний час існує ряд технічних рішень задач зварювання сталевих конструкцій великих (10...50 мм) товщин, наприклад корпусних елементів кораблів, труб магістральних трубопроводів, великогабаритних судин, будівельних конструкцій тощо. Для рішення таких задач звичайно використовують електродугове і електрошлакове зварювання, причому перший процес може бути як багатопрохідним, так і багатодуговим. Однак, використання цих технологій не завжди є оптимальним, що підтримує інтерес дослідників і призводить до появи нових розробок[42]. Це пов'язано з такими особливостями електродугових технологій, як малі швидкості процесу (багатопроходне електродугове і електрошлакове зварювання) і значні енерго– і тепловкладання (багатодугове зварювання). В результаті виникає ряд недоліків: великий розмір зварювальної ванни і ЗТВ, схильність до виникнення гарячих тріщин, велика витрата присаджувального дроту, необхідність наступної термічної обробки (відпустки), значні залишкові термічні деформації, необхідність рихтування товстостінних виробів, пов'язана з використанням потужного пресового устаткування, порівняно низька продуктивність процесу (крім багатодугового зварювання), необхідність у попередньому механічному обробленні крайок під кутом 30° і більшими кутами.

Для підвищення якості та довговічності доцільним є максимально наблизити структуру зварних з'єднань до структури основного металу – тобто сучасних трубних сталей. Тому розглянемо останні тенденції, що впливають на їх виготовлення. Основні напрямки розвитку трубних сталей включають[43]:

зниження вмісту вуглецю, що благотворно впливає на в'язкість, зварюваність і сегрегаційну однорідність металу;

підвищення ступеню чистоти за шкідливими примісями і газами;

мікролегування;

застосування термомеханічної прокатки із прискореним охолодженням для максимального подрібнення зерна;

перехід від феритно-перлітної до феритно-бейнітної і бейнітної структур у залежності від потрібного рівня міцності сталі.

[42] Katayama S. Industrial applications of laser or hybrid welding. In Fundamentals and Details of Laser Welding (pp. 185-198). 2020. Springer, Singapore.

[43] Sharma S. K., Maheshwari S. A review on welding of high strength oil and gas pipeline steels. Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2017. Vol. 38. P. 203-217.

Такі тенденції пов'язані із потребою у збільшенні пропускної здатності магістральних трубопроводів, а отже – у збільшенні тиску в них. З позицій технології на прокатному переділі основними напрямками розвитку є перехід від низькотемпературної контрольованої прокатки з охолодженням металу на повітрі до термомеханічного контрольованого процесу із регламентованим прискореним охолодженням з метою одержання дрібнодисперсної рівномірної структури (без різнозернистості і полосчатості) із зниженим рівнем напруг. Для цього потрібне оснащення прокатних станів відповідним обладнанням, автоматизація процесу прокатки і охолодження, а також використання прогресивних способів зварювання труб на етапі їх виготовлення.

Багатьма дослідницькими інститутами спільно з провідними металургійними комбінатами проводиться розробка ряду сучасних трубних сталей. Вони можуть застосовуватись для різних технологічних схем прокатки: на неперервному широкополосному, на потужному листопрокатному станах з установкою прискореного охолодження. Це, в першу чергу, сталі класів міцності від К56 до К65, з яких виготовляється листовий і рулонний прокат на комбінатах, ММК і «Азовсталь».

Важливішим показником якості сталей для газопровідних труб, яке забезпечується шляхом використання контрольованої прокатки, є тест ІПГ (DWTT), що потребує наявності виключно дрібнозернистої структури. Сталі з феритно-бейнітної структурою мають більший запас в'язкості (KCV) і високу хладостійкість при низьких температурах навіть при товщині листа 32-36 мм. Так, прокат зі сталі 05Г2МНДБ товщиною 36 мм при температурі -60°С має ударну в'язкість понад 250 Дж/см^2, а доля в'язкого волокна на зломі зразків ІПГ – понад 70%. Молібден сприяє формуванню бейніту: при збільшенні його вмісту структура подрібнюється, підвищується низькотемпературна в'язкість і зростає доля в'язкої складової на зломі зразків ІПГ. При температурі -60°С сталь, що містить 0,25%Мо, дає на зразках ІПГ повністю в'язкий злом. Усі нові сталі добре зварюються; мають великий запас в'язкості у ЗТВ (швидкість охолодження ~10°С/с) на відміну від традиційної феритно-перлітної сталі 10Г2ФБ. Твердість металу у ЗТВ для нових сталей із феритно-бейнітною структурою не перевищує твердість типової традиційної сталі з феритно-перлітною структурою. Твердість зварних з'єднань, виконаних на цих сталях, також не повинна перевищувати стандартні показники (HV 240...260).

В нашій країні також ведуться аналогічні дослідження. Наприклад, для підвищення надійності зварних з'єднань трубних сталей широке розповсюдження на трубних заводах України отримав зварювальний дріт типу Св-08(07)Г1НМА[44]. Доречи, окрім виготовлення трубопроводів для транспортування нафти і газу, розповсюджені трубопроводи для водопостачання.

Таким чином, спосіб зварювання трубних сталей та результати його застосування повинні відповідати наведеним сучасним тенденціям. Одержані зварювальні структури повинні бути щонайближчими до структур відповідних трубних сталей.

Традиційно, для вирішення таких задач, використовують багатодугове зварювання[45]. Однак, використання цієї технології не повністю відповідає вказаним вимогам. Це пов'язано з такими особливостями цієї технології, як значні енерго– і тепловкладання. В результаті виникає ряд недоліків: великий розмір зварювальної ванни і ЗТВ, схильність до виникнення гарячих тріщин, великі витрати присаджувального дроту, необхідність наступної термічної обробки (відпуску), значні залишкові термічні деформації, необхідність рихтування товстостінних виробів, пов'язана з використанням потужного пресового обладнання, необхідність у попередньої механічної розробці крайок під кутом 30° і більш.

Для усунення деяких з перерахованих недоліків була розроблена технологія контактного зварювання сталей значних товщин. В ІЕЗ ім. Є.О.Патона розроблено технології та обладнання для стикового зварювання неперервним оплавленням трубопроводів діаметром від 57 до 1420 мм[46]. До переваг цього способу відносяться висока продуктивність (6-12 стиків у годину), виконання зварювання без допоміжних матеріалів, стабільність процесу. Однак, має місце

---

[44] Рыбаков А. А., Костин В. А., Филипчук Т. Н., Прибытько И. А. Особенности формирования микроструктуры металла швов газонефтепроводных труб при дуговой сварке микролегированных сталей. Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. 2013. № 1. С. 125-131.

[45] Величко А. А., Шабалов И. П., Борцов А. Н. Роль тепловых параметров сварки и их влияние на микроструктуру, морфологию и свойства зоны термического влияния при производстве прямошовных труб. Наука и техника в газовой промышленности. 2015. № 4. С. 18-29.

[46] Кучук-Яценко С. И., Казымов Б. И., Загадарчук В. Ф. (). Влияние структуры металла труб на механические свойства сварных соединений, выполненных контактной сваркой оплавлением. Автоматическая сварка. 2017. № 4. С. 5-10.

такий недолік, як утворення грату не лише назовні, але й на внутрішній частині зварного стику. Часто останній лишається у трубопроводі й згодом відривається, уноситься течією та попадає під запірні клапани, виводячи їх з ладу. Ще одним недоліком можна вважати порівняно невисоку ударну в'язкість. Так, для сталі Х70 при температурі -30°С ударна в'язкість швів KCV становить 35...67 Дж/см^2, у той час, як при такій температурі бажано одержати значення у 1,5-2 рази більші.

Альтернативною технологією, яка дозволить усунути вказані недоліки, є одно– і багатопрохідне лазерно-дугове зварювання з плавким електродом. Завдяки порівняно невеликим розміру зварювальної ванни і куту сходження лазерного випромінювання попередня розробка крайок не повинна перевищувати 10…20°, що призводить до мінімізації термічного впливу на основний метал і розмір ЗТВ, зниження рівню залишкових деформацій, підвищення продуктивності процесу. При зварюванні технологічного шву, потрібного при виготовленні труб, розробка крайок взагалі непотрібна. Зниження собівартості обладнання, яке використовується для запропонованого процесу, можливе за рахунок часткової заміни лазерної потужності дуговою. Дослідження показують, що при певних умовах проведення гібридного зварювання 1,0 кВт дугової потужності спроможні замінити від 0,5 до 1,0 кВт потужності лазерного випромінювання[47].

Перспективним є впровадження технологічних процесів лазерно-дугового зварювання трубних сталей товщиною понад 20 мм, а також необхідного для їх реалізації додаткового оснащення, які дозволять підвищити продуктивність зварювання, знизити собівартість зварних конструкцій, локалізувати термічний вплив, усунути потребу у фінішній механічній обробці (рихтуванні), отримати з'єднання із ударною в'язкістю і твердістю, близькими до ударної в'язкості та твердості основного металу.

У разі багатодугового зварювання труб при їх виготовленні необхідним є виконання технологічного монтажного шву. Цей шов переварюється при двопрохідному багатодуговому зварюванні і потрібний для утримання трубних заготовок у зборі в кондукторі. Зараз його виконують зварюванням дугою із плавким електродом.

[47] Шелягин В. Д., Хаскин В. Ю., Бернацкий А. В., Сиора А. В. Перспективы применения лазерной и гибридной технологий сварки сталей для повышения эксплуатационного ресурса трубопроводов. Автоматическая сварка. 2010. № 10. С. 37-40.

Доцільним є або замінити процес дугового зварювання більш продуктивним (наприклад, лазерним), або взагалі усунути за рахунок використання замість багатодугового таке зварювання, при якому тимчасові напруги і деформації є значно меншими.

Таким чином, застосування лазерного або лазерно-дугового зварювання представляє інтерес як для зварювання неповоротних стиків при монтажі магістральних трубопроводів, так і для виготовлення труб для них.

Одним із способів зварювання сталей великих товщин є багатопрохідне лазерне зварювання з присаджувальним дротом. Згідно запропонованої у роботі[48] технології, стальну плиту товщиною 50 мм зварили встик із ступінчатою розробкою крайок (ширина розробки вверху становила 6 мм) за 5 проходів із присаджувальним дротом ∅1,6-2,0 мм при швидкості зварювання 21 м/год і потужності випромінювання CO_2-лазера 10 кВт. В якості захисного газу застосовували аргон або гелій. Особливістю процесу є те, що лазерне випромінювання фокусували на кінці присаджувального дроту, який подавали в зону зварювання під кутом 45°. В результаті плавлення дроту відбувався перенос металу каплями ∅2-6 мм, температуру поверхні яких вимірювали пірометром. Така технологія дозволила усунути обмеження глибини проплавлення лазерним випромінюванням, пов'язане з його екрануванням плазмовим факелом, який виходить з парогазового каналу. Відмітимо, що таке екранування збільшується пропорційно збільшенню потужності випромінювання. Однак, до недоліків лазерного багатопрохідного зварювання слід віднести порівняно малу продуктивність, складність підготовки крайок для зварювання, необхідність використання лазерів з великою (10…15 кВт) потужністю і можливість несплавлення присаджувального металу з основним.

У ІЕЗ ім. Є.О. Патона проводилися дослідження багатопрохідного гібридного лазерно-дугового зварювання сталей великих (10…20 мм) товщин із застосуванням CO_2-лазера і дуги плавкого електроду[49]. При цьому застосовували V-подібну розробку крайок з кутом до 10°.

[48] Arata Y., Maruo H., Miyamoto I., Nishio R. CO2 laser welding of thick plate multipass welding with filler wire. In Electron and laser beam welding. International Conference. 1986. Vol. 4. P. 159-169.

[49] Shelyagin V., Khaskin V., Bernatskyi A., Siora A., Sydorets V., Chinakhov D. A. Multi-pass laser and hybrid laser-arc narrow-gap welding of steel butt joints. Materials Science Forum. 2018. Vol. 927. P. 64-71.

Проведені експерименти показали, що у випадку вузької (10°) V-подібної розробки крайок лазерне випромінювання стабілізує електричну дугу і змушує її опускатися на глибину 20 мм і більше. Цей ефект буде покладено в основу технології, яка розроблюється.

До переваг запропонованої технології відносяться наступні:

1. Завдяки малим розмірам зварювальної ванни (порядку 5-10 мм) і куту збігу лазерного випромінювання (порядку 10…20°) спрощується попередня розробка крайок (не перевищує 10…15° для кожної), мінімізуються термічний вплив на основний метал і величину ЗТВ, знижується рівень залишкових деформацій до повного їх усунення.

2. Використання порошкового присаджувального матеріалу за рахунок доброго поглинання лазерного випромінювання дозволить знизити його потужність приблизно на 30%.

3. Жорсткий термічний цикл, характерний для лазерного зварювання, пом'якшується за рахунок дії дугового джерела, схильність до утворення структур загартування знижується за рахунок кількох проходів.

4. Застосування багатопрохідного гібридного зварювання дозволить підвищити продуктивність процесу, що розробляється, а також частково замінити лазерну потужність дуговою, що значно знижує вартість обладнання.

Аналіз сучасних наукових праць з даного питання показує, що лазерно-дугове зварювання трубних сталей почало викликати все більше зацікавлення дослідників. Зокрема, це пов'язане із виникненням і розповсюдженням волоконних лазерів[50]. Так, у TWI Ltd (Great Abington, Cambridge, Великобританія) було вивчено досягнення в галузі розвитку гібридного зварювання сталевих трубопроводів за останнє десятиріччя. Одним з найперспективніших варіантів гібридного зварювання було визнано таке, при якому випромінювання Yb-волоконного лазера застосовується спільно із MAG-процесом. Зварювання бажано вести в один прохід.

Із сказаного витікає, що з боку підвищення продуктивності процесу зварювання товстих трубних сталей доцільно застосовувати однопрохідний процес, але з позицій підвищення якості шву і ЗТВ (збільшення ударної в'язкості, зниження твердості, уникнення утворення мартенситних структур, створення можливості уникнення

[50] Sharma S. K., Maheshwari S. A review on welding of high strength oil and gas pipeline steels. Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2017. Vol. 38. P. 203-217.

фінішної термообробки) – бажаним є багатопрохідний. З боку підвищення економічної ефективності одержання з'єднань перевагу має гібридне зварювання, при якому лазерне випромінювання, що по-можливості має коротшу довжину хвилі та може транспортуватися по оптичному волокну, сполучають із дугою з плавким електродом. Залежно від основного матеріалу може застосовуватися (або не застосовуватися) попередній і супутній підігрів. Зазвичай, температури попереднього і супутнього підігріву лежать в межах 100...300°С, а температури фінішного відпуску – становлять близько 500...600°С.

Таким чином, актуальність даної частини роботи міститься у створенні нового способу підвищення експлуатаційного ресурсу трубопровідного транспорту за рахунок застосування для виготовлення труб технології та обладнання лазерно-дугового зварювання із можливістю реалізації підігріву до, після і в процесі зварювання. Розробка такого способу потребує не лише створення відповідних технологічних прийомів гібридного зварювання товстих (до 50 мм) сталей і сплавів, але також й проектування обладнання, необхідного для реалізації її та потрібних процесів підігріву. Заходи що розробляються, в перспективі дозволять підвищити продуктивність зварювання, значно знизити собівартість зварних конструкцій, локалізувати термічний вплив, усунути необхідність у фінішної механічної обробці (рихтуванні), а у ряді випадків – необхідність у термообробці зварних швів.

3. Визначення найбільш перспективних напрямків розвитку процесів зварювання сталей, заснованих на використанні лазерного й гібридного лазерно-дугового джерел нагріву

Існує велика кількість задач зварювання сталевих конструкцій великих товщин, наприклад корпусних елементів суден, труб магістральних трубопроводів, крупно габаритних сосудів, будівельних конструкцій тощо. Для вирішення таких задач не завжди оптимальним є застосування дугового зварювання – або через малі швидкості процесу (багато прохідне зварювання), або через велике енерговкладання (багатодугове зварювання). В усіх випадках дугове зварювання характеризується потребою у попередньої механічної розробці кромок під кутом 30° і більше, значним перегрівом основного металу, великим розміром зварювальної ванни і ЗТВ, наявністю небажаних залишкових деформацій. Альтернативною технологією, яка дозволить усунути вказані недоліки, є багатопрохідне лазерне зварювання з

присаджувальним дротом. Завдяки малим розміру зварювальної ванни (порядку 10-30 мм) і куту сходження лазерного випромінювання попередня розробка кромок не повинна перевищувати 10°, мінімізуються термічний вплив на основний метал і розмір ЗТВ, знижується рівень залишкових деформацій. Жорсткий термічний цикл, характерний для лазерного зварювання, пом'якшується за рахунок декількох проходів. Для підвищення продуктивності запропонованого процесу, а також часткової заміни лазерної потужності дуговою, доцільно використовувати одно– або багатопрохідне гібридне зварювання лазерним випромінюванням і дугою плавкого електроду. Актуальність даної роботи полягає у перспективності впровадження технологічних процесів багатопроходного лазерного і гібридного лазерно-дугового зварювання сталей товщиною 10...50 мм, а також необхідного для їх реалізації додаткового оснащення, які дозволять підвищити продуктивність зварювання, значно знизити собівартість зварних конструкцій, локалізувати термічний вплив, усунути потребу у фінішній механічній обробці (рихтуванні), отримати з'єднання із ударною в'язкістю не нижчою за 75-80% від ударної в'язкості основного металу і мікротвердістю швів не вищою за 2500-2800 МПа.

Хотілося б відзначити ще раз основні переваги лазерно-дугового зварювання. Дугове і лазерне зварювання низьколегованих та вуглецевих конструкційних сталей взаємно доповнюють один одного за рахунок своїх переваг і взаємно нівелюють недоліки, властиві кожному із способів зварювання:

– вплив дуги на метал збільшує коефіцієнт поглинання лазерного випромінювання, сприяючи підвищенню ефективного і термічного ККД зварювання;

– дуга, збільшуючи обсяги розплаву, дозволяє зменшити жорсткість термічного циклу і, отже, сприятливо впливає на технологічну міцність зварного з'єднання;

– дуга дозволяє знизити вимоги до точності геометрії збирання деталей, що зварюються;

– вплив лазерного випромінювання на метал в режимі глибокого проплавлення супроводжується інтенсивним випаровуванням і плазмоутворенням, що забезпечує стабілізацію дуги;

– гібридний процес зварювання дозволяє знизити потужність лазерного випромінювання і, відповідно, споживання енергії від лазерного джерела. Твердотільний лазер має повний ККД приблизно 3%. Зниження потужності лазерного випромінювання на 1 кВт дає

зниження потужності, що споживається з електричної мережі приблизно на 35 кВА;

– заміна до половини лазерної потужності на електричну потужність дуги не знижує ефективності і продуктивності процесу лазерного зварювання. Саме в цьому полягає головна техніко-економічна ефективність лазерно-дугового зварювання, так як вартість одного кіловата лазерної енергії набагато більше вартості одного кіловата енергії дуги. Гібридне лазерно-дугове зварювання, як показують розрахунки, при повному завантаженні устаткування в 1,5-2 рази ефективніше в порівнянні з лазерним;

– гібридне лазерно-дугове зварювання вимагає істотно менших капіталовкладень, ніж лазерне зварювання, так як обладнання для дугового зварювання коштує значно дешевше;

Таким чином, гібридне лазерно-дугове зварювання реалізує технологічний процес, в якому взаємно посилюються переваги кожного із способів зварювання і зменшуються недоліки, що призводить до розширення технологічних можливостей.

Аналіз літературних джерел, переважно закордонних, свідчить про зацікавленість дослідниками використання гібридного лазерно-дугового зварювання для високоміцних сталей при виготовлені металоконструкцій. Як було показано, обмежене тепловкладення при лазерному та лазерно-дуговому зварюванні може призводити до утворення гартівних структур в металі шва та ЗТВ, але яким чином це може вплинути на механічні властивості зварних з'єднань високоміцних сталей в технічній літературі інформація відсутня. Натомість відомо, що при даному способі зварювання залишкові деформації менші ніж при дугових процесах. Це повинно позитивно позначитись на стійкості зварних з'єднань високоміцних сталей до утворення холодних тріщин. Але данні, які б це підтверджували чи спростовували в технічній літературі також відсутні.

Відомо, що на механічні властивості та опір зварних з'єднань високоміцних сталей утворенню холодних тріщин значно впливає структура металу швів і ЗТВ з'єднань. В даний час досить добре вивчені процеси структуроутворення в металі швів і ЗТВ зварних з'єднань при дуговому зварюванні. Вплив термічного циклу при гібридному лазерно-дуговому зварюванні на структуру і властивості металу шва і ЗТВ залишається вивченим недостатньо, так як в результаті синергетичного ефекту, при такому процесі, перераховані вище параметри можуть суттєво змінюватися.

Тому виникає необхідність проведення комплексного аналізу впливу гібридного лазерно-дугового зварювання на структуру, механічні властивості і технологічну міцність зварних з'єднань високоміцних сталей та досліджень спрямованих на створення технологічних рекомендацій по зварюванню високоміцних легованих сталей товщиною до 10 мм з границею текучості більше 700 МПа.

Аналіз літературних джерел, наведений вище, показує, що також перспективним напрямком розвитку досліджень є вирішення проблем, що виникають при багатопрохідному зварюванні сталей великих товщин. Дугове зварювання у захисних газах, зварювання під флюсом, та електрошлакове зварювання широко застосовуються для виготовлення сталевих конструкцій із низьколегованих та вуглецевих конструкційних сталей товщиною до 50 мм для виготовлення трубного прокату, великогабаритних суден та неповоротних стиків нафто– та газопроводів, верстатобудуванні, важкому машинобудуванні тощо. Однак, крім певних технологічних переваг, ці способи зварювання мають і ряд недоліків, таких як великий розмір зварного шва та ЗТВ, схильність до гарячого розтріскування, необхідність післязварної термічної обробки, наявність високих залишкових термічних деформацій. Низька продуктивність дугових процесів пояснюється також необхідністю попереднього скосу кромки під кутом 30° і більше. Відомі технології автоматизованого багатопрохідного дугового зварювання сталей великих товщин (товщиною до 100 мм та більше). Багатопрохідне вузькозазорне зварювання забезпечує високі механічні властивості зварних з'єднань у товстих сталевих пластинах без післязварної високотемпературної термічної обробки (нормалізації), причому не тільки високу міцність, але й пластичність металу шва та ЗТВ. Причина в тому, що при багатопрохідному зварюванні наступні шари металу забезпечують термообробку раніше наплавлених і низьку швидкість охолодження зварювального валика. Процес зварювання характеризується відносно низьким тепловведенням. Найпоширенішими недоліками дугового зварювання з вузькими зазорами є відсутність оплавлення між краями зварного шва, а також наявність пор, тріщин і шлакових включень в металі шва. Усунути недоліки розплавлення та запобігти пори та шлакові включення досить важко. Крім того, проблемою є також холодні тріщини, що утворюються при зварюванні загартованих сталей без попереднього нагрівання. У цьому випадку рекомендується використовувати дво– та багатодугове зварювання. Для досягнення надійності

багатопрохідного вузькодугового зварювання та якості одержуваних зварних швів необхідно проводити спеціальні заходи щодо забезпечення стабільного положення дуги відносно кромок зварного шва. Для цього були розроблені різні конструкції зварювальних головок, напрямних контактних трубок, наконечників пальника, плоских насадок і технологічних вкладок. Однією з альтернативних технологій, що дозволяють усунути зазначені недоліки та зберегти переваги, є багатопрохідне лазерне зварювання з присаджувальним дротом. До недоліків багатопрохідного лазерного зварювання за методом, можна віднести порівняно низьку продуктивність процесу, складність підготовки канавки до зварювання, необхідність використання високої потужності (10-15 кВт) лазерів, і ймовірність відсутності сплавлення між наповнювачем і основним металом. Тому відпрацювання технологій багатопрохідного лазерного та гібридного лазерно-дугового зварювання сталей товщиною 10-30 мм для уникнення недоліків технологій багатопрохідного дугового зварювання є актуальною науково-прикладною задачею.

На підставі проведених досліджень можна виділити перспективні напрямки впровадження лазерного і лазерно-дугового зварювання трубних сталей – як для випадку виготовлення труб, так і для монтажу неповоротних стиків магістральних трубопроводів. Так, найбільш перспективним для виготовлення труб магістральних трубопроводів є застосування гібридного лазерно-дугового зварювання для монтажу заготовок – високошвидкісне зварювання притуплення крайок заготовок повздовжнім монтажним технологічним швом, який переварюється при багатодуговому зварюванні. Друге місце за перспективністю промислового впровадження при виготовлення великогабаритних труб займає гібридне лазерно-дугове зварювання основним швом. В останньому випадку необхідним є застосування технологічних лазерів великої потужності (не менш 20 кВт). Більш актуальною є задача монтажу неповоротних стиків магістральних трубопроводів із застосуванням лазерного і гібридного зварювання. Тут одним з найкращих варіантів є застосування лазерного зварювання із присаджувальним дротом для формування кореневого шву і заплавлення вузької розробки крайок лазерно-дуговим способом. Перевагою застосування лазерного зварювання для одержання нижнього валика, з яким контактує агресивне середовище, що знаходиться всередині трубопроводу, є одержання рівновісної дрібнозернистої структури.

Така структура здатна зменшити темпи міжкристалітної корозії, що збільшить експлуатаційний ресурс трубопроводів.

ВИСНОВКИ

Одним з перспективних методів, який допоможе вирішити питання пов'язані з підвищенням продуктивності процесу зварювання і якості зварних з'єднань, може бути лазерне та гібридне лазерно-дугове зварювання в середовищі захисних газів. Перевагами цих вид зварювання є: значне зниження погонної енергії; підвищення продуктивності за рахунок збільшення на порядок швидкості зварювання; отримання рівноважних дрібнозернистих мікроструктур в металі шва зони термічного впливу, що підвищують міцність з'єднань і знижують схильність до утворення тріщин. А також – можливість з'єднання металів малої товщини і висока точність зварювання. Тому було зроблено аналіз за літературними джерелами щодо лазерного та гібридного лазерно-дугового зварювання різних сталей та показана перспективність використання цих способів зварювання для вказаного класу сталей

АНОТАЦІЯ

Виконано огляд наукових праць присвячених дослідженню впливу складових процесів лазерного та гібридного лазерно-дугового зварювання на формування структури та рівень механічних характеристик зварних з'єднань конструкційних сталей. Аналіз літературних джерел свідчить про зацікавленість дослідниками використання гібридного лазерно-дугового зварювання для високоміцних сталей при виготовлені металоконструкцій. Обмежене тепловкладення при лазерному та лазерно-дуговому зварюванні може призводити до утворення гартівних структур в металі шва та ЗТВ, але яким чином це може вплинути на механічні властивості зварних з'єднань високоміцних сталей в технічній літературі інформація відсутня. Натомість відомо, що при даному способі зварювання залишкові деформації менші ніж при дугових процесах. Це повинно позитивно позначитись на стійкості зварних з'єднань високоміцних сталей до утворення холодних тріщин. Але данні, які б це підтверджували чи спростовували в технічній літературі також відсутні. Також, на підставі проведеного аналізу джерел, можна виділити такі перспективні напрямки впровадження лазерного і лазерно-дугового зварювання трубних сталей, як для випадку

виготовлення труб, так і для монтажу неповоротних стиків магістральних трубопроводів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Arata Y., Maruo H., Miyamoto I., Nishio R. CO_2 laser welding of thick plate multipass welding with filler wire. *In Electron and laser beam welding. International Conference*. 1986. Vol. 4. P. 159-169.
2. Artinov A., Bachmann M., Meng X., Karkhin V., Rethmeier M. On the relationship between the bulge effect and the hot cracking formation during deep penetration laser beam welding. *Procedia CIRP*. 2020. Vol. 94. P. 5-10.
3. Berdnikova O., Pozniako, V., Bushma O. Laser and hybrid laser-arc welding of high strength steel NA-XTRA-70. *Materials Science Forum*. 2016. Vol. 870. P. 630-635.
4. Cao X., Wanjara P., Huang J., Munro C., Nolting A. Hybrid fiber laser–arc welding of thick section high strength low alloy steel. *Materials & Design*. 2011. Vol. 32. Iss. 6. P. 3399-3413.
5. Gook S., Gumenyuk A., Rethmeier, M. Weld seam formation and mechanical properties of girth welds performed with laser-GMA-hybrid process on pipes of grade X65. *In International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics 2010*. Vol. 2010, No. 1. P. 62-69.
6. Gumenyuk A., Rethmeier M. Laser-MSG-Hybridschweißen von dickwandigen präzisionsrohren. *Schlussbericht. Förderkennzeichen AiF.* 2007. P. 15917.
7. Katayama S. Industrial applications of laser or hybrid welding. *In Fundamentals and Details of Laser Welding* (pp. 185-198). 2020. Springer, Singapore.
8. Kelly S. M., Brown S. W., Tressler J. F., Martukanitz R. P., Ludwig, M. J. Using hybrid laser-arc welding to reduce distortion in ship panels. 2009. *Welding Journal*. Vol. 88. Iss. 3. P. 32-36.
9. Laitinen R., Kömi J., Keskitalo M., Mäkikangas J. Improvement of the strength of welded joints in ultra high strength Optim 960 QC using autogenous Yb:YAG laser welding. *In Proceedings of 11th Nolamp Conference* (pp. 204-214). 2007. Lappeenranta: Finland.
10. Laitinen R., Lehtinen M., Kujanpää V. Fellman A. Influence of laser and hybrid laser-MAG (hybrid) welding on the strength and toughness of the weld HAZ of ultra high strength steel optim RAEX 960 QC. *In 10th Nordic Laser Materials Processing Conference, NOLAMP 10*. 2005. Luleå University of Technology: Finland.

11. Neyezhmakov P., Tymofeiev E., Lyashenko O. Automation of dosimetric control for laser radiation. *Metrology and instruments*. 2018. Iss. 6. P. 28-35.

12. Nolting A. E., Munro C., Cao X. J., Wanjara P. Mechanical properties of HSLA-65 hybrid laser arc welds. *Canadian Metallurgical Quarterly*. 2012. Vol. 51. Iss. 3. P. 336-345.

13. Panchuk M., Sładkowski A., Panchuk A., Semianyk I. New technologies for hull assemblies in shipbuilding. *NAŠE MORE: znanstveni časopis za more i pomorstvo.* 2021. Vol. 68. Iss. 1. P. 48-57.

14. Paul C., Zimmermann G. MSG-Laserstrahl-Hybridschweißen in der industriellen Anwendung bei dicken Blechstärken. In Proceedings: 8. Internationale Konferenz Strahltechnik. Halle. 2010, April.

15. Pozniakov V., Markashova L., Berdnikova O. M., Alekseienko T., Zhdanov S. Structure and crack resistance of NA-XTRA-70 steel joints manufactured by hybrid laser-arc welding. *Materials Science Forum*. Vol. 2018927. P. 29-34.

16. Poznyakov V. D., Markashova L. I., Shelyagin V. D., Zhdanov S. L., Bernats'kyi A. V., Berdnikova O. M., Sydorets V. M. Cold cracking resistance of butt joints in high-strength steels with different welding techniques. *Strength of Materials*. 2019. Vol. 51. Iss. 6. P. 843-851.

17. Razab M. K. A. A., Jaafar M. S., Abdullah N. H., Suhaimi F. M., Mohamed M., Adam N., Yusuf N. A. A. N. A review of incorporating Nd: YAG laser cleaning principal in automotive industry. *Journal of radiation research and applied sciences.* 2018. Vol. 11. Iss. 4. P. 393-402.

18. Salminen A., Farrokhi F., Unt A., Poutiainen I. Effect of optical parameters on fiber laser welding of ultrahigh strength steels and weld mechanical properties at subzero temperatures. Journal of Laser Applications. 2016. Vol. 28. Iss. 2. P. 022415.

19. Schmid D., Stanton N. A. How are laser attacks encountered in commercial aviation? A hazard analysis based on systems theory. *Safety science.* 2018. Vol. 110. P. 178-191.

20. Sharma S. K., Maheshwari S. A review on welding of high strength oil and gas pipeline steels. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2017. Vol. 38. P. 203-217.

21. Shelyagin V., Khaskin V., Bernatskyi A., Siora A., Sydorets V., Chinakhov D. A. Multi-pass laser and hybrid laser-arc narrow-gap welding of steel butt joints. *Materials Science Forum*. 2018. Vol. 927. P. 64-71.

22. Siltanen J., Tihinen S., Kömi J. Laser and laser gas-metal-arc hybrid welding of 960 MPa direct-quenched structural steel in a butt joint

configuration. *Journal of Laser Applications*. 2015. Vol. 27. Iss. S2. P. S29007.

23. The rise and rise (telescopically) of laser welding. *Welding and Metal Fabrication.* 1999. Vol. 67. Iss. 6. P. 11–12.

24. Thomy C., Seefeld T., Vollertsen F., Vietz E. Application of fiber lasers to pipeline girth welding. *Welding journal*. 2006. Vol. 85. Iss. 7. P. 30-33.

25. Turichin G., Kuznetsov M., Tsibulskiy I., Firsova A. Hybrid laser-arc welding of the high-strength shipbuilding steels: equipment and technology. *Physics Procedia*. 2017. Vol. 89. P. 156-163.

26. Unt A., Poutiainen I., Grünenwald S., Sokolov M., Salminen A. High power fiber laser welding of single sided T-joint on shipbuilding steel with different processing setups. *Applied Sciences.* 2017. Vol. 7. Iss. 12. P. 1276.

27. Xu W., Westerbaan D., Nayak S. S., Chen D. L., Goodwin F., Zhou Y. Tensile and fatigue properties of fiber laser welded high strength low alloy and DP980 dual-phase steel joints. *Materials & Design.* 2013. Vol. 43. P. 373-383.

28. Zhang K., Li D., Gui H., Li Z. Adaptive control for laser welding with filler wire of marine high strength steel with tight butt joints for large structures. *Journal of Manufacturing Processes.* 2018. Vol. 36. P. 434-441.

29. Величко А. А., Шабалов И. П., Борцов А. Н. Роль тепловых параметров сварки и их влияние на микроструктуру, морфологию и свойства зоны термического влияния при производстве прямошовных труб. *Наука и техника в газовой промышленности*. 2015. № 4. С. 18-29.

30. Ках П., Салминен А., Мартикаинен Д. Особенности применения гибридной лазерно-дуговой сварки (Обзор). *Автоматическая сварка*. 2010. № 6. С. 38-47.

31. Кривцун И. В., Крикент И. В., Демченко В. Ф., Райсген У., Забиров А. Ф., Мокров О. А. Взаимодействие излучения CO_2-лазера с плазмой аргоновой дуги при гибридной (лазер+ ТИГ) сварке. *Автоматическая сварка*. 2015. № 3-4. С. 7-16.

32. Кривцун И. В., Хаскин В. Ю., Коржик В. Н., Ло Ц. Промышленное применение гибридной лазерно-дуговой сварки (Обзор). *Автоматическая сварка*. 2015. № 7. С. 44-50.

33. Кучук-Яценко С. И., Казымов Б. И., Загадарчук В. Ф. Влияние структуры металла труб на механические свойства сварных

соединений, выполненных контактной сваркой оплавлением. *Автоматическая сварка*. 2017. № 4. С. 5-10.

34. Панчук М. В., Шлапак Л. С., Матвієнків О. М., Козак О. Л. Сучасні технології зварювання магістральних нафтогазопроводів. *Scientific Bulletin of Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas.* 2011. № 3(29). С. 24-29.

35. Пилярчик Я., Банасик М., Дворак Д., Стано С. Лазерные установки в современных сварочных технологиях. Исследование и применение. *Автоматическая сварка*. 2008. № 11. С. 88-92.

36. Райзген У., Ольшок С. Гибридная лазерно-дуговая сварка под флюсом. *Автоматическая сварка*. 2009. № 4. С. 46-51.

37. Рыбаков А. А., Костин В. А., Филипчук Т. Н., Прибытько И. А. Особенности формирования микроструктуры металла швов газонефтепроводных труб при дуговой сварке микролегированных сталей. *Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*. 2013. № 1. С. 125-131.

38. Туричин Г. А., Цибульский И. А., Валдайцева Е. А., Лопота А. В. Гибридная лазерно-дуговая сварка металлов больших толщин. *Сварка и диагностика*. 2009. № 3. С.16-23.

39. Туричин Г. А., Цибульский И. А., Кузнецов М. В., Ахметов А. Д. Лазерно-дуговая сварка в различных пространственных положениях. *Материаловедение. Энергетика*. 2013 Том 4-1. № 183. С. 218-225.

40. Ушаков А. Б., Морозова О. П., Бегунов И. А., Шамов Е. М., Орешкин А. А., Вышемирский Е. М. Технология лазерной сварки магистральных трубопроводов. Газовая промышленность. 2017. № S2(754). С. 100-107.

41. Шелягин В. Д., Хаскин В. Ю., Бернацкий А. В., Сиора А. В. Перспективы применения лазерной и гибридной технологий сварки сталей для повышения эксплуатационного ресурса трубопроводов. *Автоматическая сварка*. 2010. № 10. С. 37-40.

Information about the author:
Bernatskyi Artemii Volodymyrovych,
Candidate of Technical Sciences,
Senior Researcher at the Department of Specialized High-Voltage Technique and Laser Welding
E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine
11, Kazymyra Malevycha Str., Kyiv, 03150, Ukraine