

ІНЖЕНЕРНІ НАУКИ

УДК 621.791.72

<https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2022.3.1>

А. В. БЕРНАЦЬКИЙ

Інститут електрозварювання імені Є. О. Патона Національної академії наук України

ORCID: 0000-0002-8050-5580

В. Ю. ХАСКІН

Інститут електрозварювання імені Є. О. Патона Національної академії наук України

ORCID: 0000-0003-3072-6761

О. В. СІОРА

Інститут електрозварювання імені Є. О. Патона Національної академії наук України

ORCID: 0000-0003-1927-790X

В. А. ЛУКАШЕНКО

Інститут електрозварювання імені Є. О. Патона Національної академії наук України

ORCID: 0000-0002-9685-4654

О. О. ДАНИЛЕЙКО

Інститут електрозварювання імені Є. О. Патона Національної академії наук України,

Навчально-науковий інститут матеріалознавства та зварювання імені Є. О. Патона

Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ORCID: 0000-0002-8501-0421

**ПЕРСПЕКТИВИ ЛАЗЕРНОГО ТА ГІБРИДНОГО
ЛАЗЕРНО-ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ТРУБНИХ СТАЛЕЙ**

Одним зі способів вирішення проблеми зварювання магістральних трубопроводів є застосування лазерного випромінювання у якості джерела нагріву. Завдяки малим розмірам зварювальної ванни й кута сходження сфокусованого лазерного випромінювання лазерне зварювання надає можливість для значного зменшення кута розробки крайок, що зварюються. Порівняно невеликі значення погонної енергії, пов'язані з високими швидкостями лазерного зварювання, дозволяють мінімізувати тепловий вплив на деталі, що зварюються, а, отже, зменшити розмір ЗТВ і залишкові деформації. Дрібнозернисті структури литого металу шва й ЗТВ сприяють підвищенню корозійної стійкості зварних з'єднань. Гібридне лазерно-дугове зварювання трубних сталей дозволяє знизити потужність лазерного випромінювання, частково замінивши його більше дешевою потужністю електричної дуги з розрахунку 1 кВт дуги замість ~0,5 кВт лазерного випромінювання для $\delta > 5$ мм. При потужностях лазерного випромінювання до 3 кВт застосування гібридного процесу зварювання сталей доцільно до товщини стінки $\delta = 10$ мм, понад яку глибина проплавлення не зростала, незалежно від зниження швидкості зварювання. Для зварювання більших товщин доцільно використовувати випромінювання з більшими потужностями. У цих же цілях можливе застосування багатопрохідного лазерного або гібридного зварювання. При гібридному зварюванні ширина шва й ЗТВ збільшується у порівнянні з лазерним. Підвищення швидкостей зварювання й вмісту вуглецю в основному металі призводять до утворення в ЗТВ небажаних мартенситних структур. Для усунення цього недоліку дворазового перевищення дугової потужності в порівнянні з лазерною недостатньо. Хоча додатковий тепловий вплив електричної дуги й дозволяє управляти термічним циклом процесу для одержання необхідних структур металу шва й ЗТВ, однак цей момент потрібно вивчати додатково. Отримані авторами результати свідчать про те, що не дивлячись на досить високі досягнуті значення ударної в'язкості необхідні подальші дослідження, спрямовані на зниження твердості ЗТВ при гібридному лазерно-дуговому зварюванні. При лазерному зварюванні існує небезпека утворення гартівних структур як у ЗТВ, так і в литому металі шва. Дослідження структур, одержуваних у зварених з'єднаннях трубних сталей багатопрохідним лазерним і лазерно-дуговим зварюванням, а також ударної в'язкості й корозійної стійкості цих з'єднань, дозволяють вважати перспективним застосування зазначених способів зварювання для підвищення ресурсу експлуатації трубопровідного транспорту.

Ключові слова: трубні сталі, магістральні трубопроводи, лазерне зварювання, гібридне лазерно-дугове зварювання, структура, властивості.

A. V. BERNATSKYI

E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine
ORCID: 0000-0002-8050-5580

V. Yu. KHASKIN

E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine
ORCID: 0000-0003-3072-6761

O. V. SIORA

E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine
ORCID: 0000-0003-1927-790X

V. A. LUKASHENKO

E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine
ORCID: 0000-0002-9685-4654

O. O. DANYLEIKO

E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine,
E. O. Paton Educational and Research Institute of Material Science and Welding
of the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
ORCID: 0000-0002-8501-0421

PROSPECTS OF LASER AND HYBRID LASER-ARC WELDING OF PIPE STEEL

One of the ways to solve the problem of welding main pipelines is to use laser radiation as a heating source. Due to the small dimensions of the welding bath and the angle of convergence of the focused laser radiation, laser welding provides an opportunity to significantly reduce the angle of development of the edges to be welded. Relatively small values of linear energy, associated with high speeds of laser welding, allow to minimize of the thermal effect on the parts being welded, and, therefore, reduce the size of HAZ and residual deformations. The fine-grained structures of the cast metal of the weld and HAZ help to increase the corrosion resistance of welded joints. Hybrid laser-arc welding of tubular steels allows for to reduction of the power of laser radiation, partially replacing it with cheaper electric arc power at the rate of 1 kW of arc instead of 0.5 kW of laser radiation for $\delta > 5$ mm. With laser radiation powers up to 3 kW, the use of the hybrid process of steel welding is expedient up to a wall thickness of $\delta = 10$ mm, beyond which the penetration depth did not increase, regardless of the reduction in welding speed. For welding larger thicknesses, it is advisable to use radiation with higher powers. For the same purposes, it is possible to use multi-pass laser or hybrid welding. In hybrid welding, the width of the seam and HAZ increases compared to laser welding. An increase in welding speeds and carbon content in the base metal leads to the formation of undesirable martensitic structures in HAZ. To eliminate this drawback, a two-fold increase in arc power compared to laser power is not enough. Although the additional thermal effect of the electric arc allows you to control the thermal cycle of the process to obtain the necessary structures of the weld metal and HAZ, this point needs to be studied further. The results obtained by the authors indicate that, despite the fairly high obtained values of impact toughness, further research aimed at reducing the hardness of HAZ during hybrid laser-arc welding is necessary. During laser welding, there is a danger of the formation of hardening structures both in the HAZ and in the cast metal of the seam. The study of the structures obtained in the welded joints of pipe steels by multi-pass laser and laser-arc welding, as well as the impact strength and corrosion resistance of these joints, allows us to consider the application of the specified welding methods to increase the service life of pipeline transport as promising.

Key words: pipe steel, main pipelines, laser welding, hybrid laser-arc welding, structure, properties.

Постановка проблеми

До основних сучасних завдань зварювання магістральних трубопроводів, як і взагалі багатьох трубних конструкцій, можна віднести наступні [1–3]:

- потреба в підвищенні ресурсу експлуатації зварених з'єднань (наприклад, за рахунок зменшення зернистості металу шва й ЗТВ, що сприяє зниженню темпів межкристаллитной корозії);
- проектування й будівництво великих трубопровідних систем (у т.ч. міжконтинентального й транснаціональних) високого тиску (порядку 10...15 МПа для сухопутних і 20...25 МПа для морських трубопроводів);
- використання для будівництва трубопроводів нових високоміцних сталей (X70, X80, X100, X120);
- підвищення продуктивності праці й автоматизація процесу зварювання;
- виконання зварювальних ремонтних робіт на сучасному рівні, який відповідає сформульованим вище завданням.

Одним зі способів рішення вказаних завдань є застосування лазерного випромінювання у якості джерела нагріву [4–6]. Завдяки малим розмірам зварювальної ванни й кута сходження сфокусованого лазерного випромінювання лазерне зварювання надає можливість для значного зменшення кута розробки крайок, що зварюються. Порівняно невеликі значення погонної енергії, пов'язані з високими швидкостями лазерного зварювання, дозволяють мінімізувати тепловий вплив на деталі, що зварюються, а, отже, зменшити розмір ЗТВ і залишкові деформації.

Дрібнозернисті структури литого металу шва й ЗТВ благотворно позначаються на підвищенні корозійної стійкості зварених з'єднань.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В останні роки в процесі зварювання для монтажу магістральних трубопроводів широко застосовуються різноманітні процеси автоматичного зварювання з високим ступенем автоматизації, низькою трудомісткістю, гарною формою зовнішнього вигляду зварних швів, високою швидкістю зварювання тощо [7–9].

Традиційно, для вирішення задач зварювання магістральних трубопроводів використовують багатодугове зварювання [7]. 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 більше.

Для усунення більшості 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 [10]. До переваг цього способу відносяться висока продуктивність (6–12 стиків у годину), виконання зварювання без допоміжних матеріалів, стабільність процесу. Однак, має місце такий недолік, як утворення грату не лише назовні, але й на внутрішній частині зварного стику. Часто останній лишається у трубопроводі й згодом відривається, уносившись 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°C ударна в'язкість швів КСV становить 35...67 Дж/см², 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 багатопротидне лазерне та гібридне лазерно-дугове зварювання з плавким електродом [11–13]. 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. Для зварювання технологічного шву, потрібного при виготовленні труб, розробка крайок взагалі не виконується. Зниження собівартості обладнання, яке використовується для запропонованого процесу, можливе за рахунок часткової заміни лазерної потужності дуговою.

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.

Для зварювання трубних сталей окрім гібридного, було запропоновано використання двопротидневого лазерного процесу [14]. Така технологія забезпечує формування зварного шву при сумарній потужності 8 кВт без загрози значних втрат лазерної потужності у плазмі, що утворюється над зварювальною ванною. Фізико-механічні властивості зварного з'єднання, виконаного двопротидневим лазерним зварюванням на трубних сталях класу К60 товщиною 8–12 мм, знаходяться на рівні основного металу. Структура останнього, як і структура шву, – ферито-перлітна, дрібнозерниста, з твердістю металу зварного шву, що не перевищує 260 НВ. При натурних випробуваннях труб, які були зварені двопротидневим лазерним зварюванням, руйнування відбулося при тиску у трубі 20 МПа, що в 3 рази перевищує робочий тиск. Не дивлячись на застосування розщеплення випромінювання і фокусування його у дві різні плями, такий спосіб зварювання можна розглядати як однопротидний.

Проведений аналіз літературних джерел свідчить про необхідність розробки додаткових технологічних прийомів для однопротидного лазерного зварювання сталей із товщинами понад 10 мм. Зі сказаного випливають основні проблеми, що постають перед нами при розробці технологічних прийомів лазерного і гібридного лазерно-дугового зварювання трубних сталей.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є дослідження можливостей збільшення ресурсу магістральних трубопроводів шляхом застосування технологій лазерного та гібридного лазерно-дугового зварювання трубних сталей.

Викладення основного матеріалу дослідження

Для експериментів по гібридному зварюванню була прийнята технологічна схема, показана на рис. 1. Із цієї схеми видно, що лазерне випромінювання розташовувалося спереду по ходу зварювання, а дуга плавкого електрода – позаду. При цьому основним завданням лазерного випромінювання було забезпечення необхідної глибини провару, а дуги – формування верхнього підсилення й така зміна термічного циклу зварювання, при якій не відбувалося б утворення небажаних бейнітних і мартенситних структур. В експериментах застосовували випромінювання потужного CO₂-лазера.

Дослідження, проведені за схемою рис. 1, показали, що при однопрохідному зварюванні сталей товщиною більше $\delta=5$ мм 1 кВт дугової потужності здатний замінити 0,5 кВт потужності лазерного випромінювання. Це означає, що гібридне зварювання дозволяє знизити собівартість застосовуваного устаткування й погонного метра звареного шва.

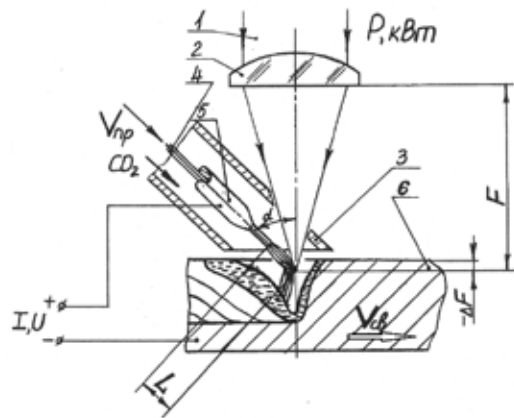


Рис. 1. Схема зварювання гібридом лазерного випромінювання й дуги плавкого електрода із захистом вуглекислим газом [7]: 1 – лазерне випромінювання потужністю P , кВт; 2 – фокусуєчий об'єктив з фокусною відстанню F , мм; 3 – захисне сопло; 4 – присаджувальний дріт; 5 – мідний мундштук для підведення струму; 6 – зразок; $V_{зв}$ – швидкість зварювання, м/год; $V_{пр}$ – швидкість подачі присаджувального дроту, м/год; ΔF – заглиблення горловини каустики випромінювання щодо поверхні зразка, мм; α – кут нахилу електрода до осі лазерного пучка, °; L – довжина дуги, мм; I – струм дуги, А; U – напруга на дузі, В

Однак з'ясувалося також, що при фіксованій потужності лазерного випромінювання максимальна глибина провару також є фіксованим параметром, тобто при зменшенні швидкості зварювання в певний момент цей параметр перестає збільшуватися (зростає ширина шва). У нашому випадку при потужності випромінювання CO_2 -лазера до 3 кВт і близькій дуговій потужності глибина провару досягла 10 мм при 30 м/год. Отже, для зварювання трубних сталей більших товщин можна застосувати два підходи: або підвищувати потужність лазерного випромінювання, або перейти до багатопрохідного зварювання. Обидва ці підходи мають свої недоліки: перший вимагає значних економічних витрат і приводить до зниження тривалості термічного циклу зварювання (а, відповідно, й до утворення небажаних гартівних структур), другий же – призводить до зниження продуктивності.

Нами були проведені дослідження багатопрохідного лазерно-дугового зварювання трубних сталей товщиною до 20 мм у вузьку розробку. Приклади структур зразків, отриманих у ході проведення експериментів, представлені на рис. 2 і рис. 3. Окрім вибору параметрів технологічного режиму досліджувалися металографічні особливості отриманих зразків, їхня корозійна стійкість і ударна в'язкість.

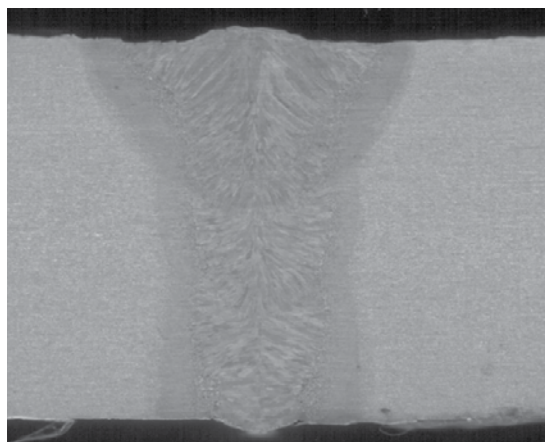


Рис. 2. Макроструктура стикового з'єднання зі сталі 10Г2ФБ ($\delta=19$ мм), звареного гібридним лазерно-дуговим способом за 4 проходи: $P=2,7$ кВт; $V_{зв}=25$ м/год.; $V_{пр}=400$ м/год ($\varnothing 1,2$ мм); $I=200$ А; $U=25$ В; захист – CO_2 з витратою $Q=20$ л/хв

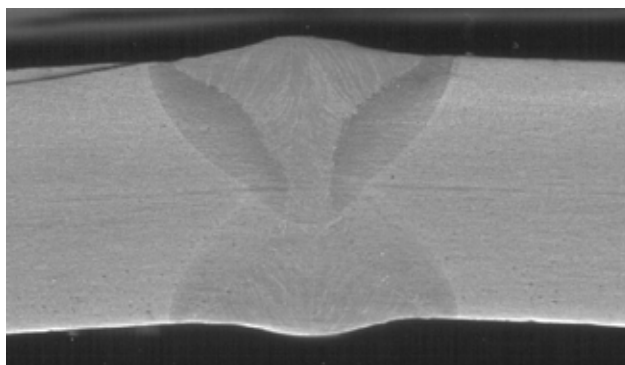


Рис. 3. Стикове з'єднання сталі 13Г1С–У ($\delta=14,3$ мм, розробка крайок Х–подібна, 30° , із притупленням 5 мм) зварене за 2 проходи в гібриді з дугою плавкого електрода Св–08Г2С $\varnothing(1,2$ мм) випромінюванням Nd:YAG–лазера в захисті сумішшю 82%Ar+18%CO₂ (Q=14 л/хв): P=4,0 кВт, I=260 А, U=27 В, $V_{зв}=30$ м/год, $V_{пр}=510$ м/год

Структуру металу зварних з'єднань, наведених на рис. 2 та рис. 3, вивчали за допомогою оптичного мікроскопу “Neophot–21” при збільшеннях 100–500 крат після травлення шліфів у 4%-ному розчині азотної кислоти у етиловому спирті. Твердість визначали за допомогою мікротвердоміру М400 фірми “Лесо” при навантаженні 4,9Н (500 гр.).

Відомо, що застосування лазерно-дугового зварювання із присаджувальним дротом дозволяє значно підвищити ширину шва порівняно із вузьким “кинджальним” швом, що характерний для лазерного зварювання. У розглянутому на рис. 3 випадку цьому в обох проходах коефіцієнт форми шва знаходився в межах $K=1,6\dots 1,7$. Такий коефіцієнт K також є характерним для дугових процесів зварювання труб товщиною 12–16 мм. Ширина шва першого проходу змінюється від 3,4 мм у найбільш вузькому місці, до 12,4 мм у верхній частині шва. Ширина шва другого проходу складала, відповідно, $\sim 2,5$ мм і ~ 16 мм. Шов другого проходу має форму, близьку до так званої грибоподібної. Довжина ЗТВ, що обмежена візуально видимими змінами структури сталі, знаходиться у межах 1,3...4,6 мм. У досліджуваних перетинах шліфу шви в обох проходах без пор і тріщин. Структури швів першого і другого проходів практично однаково дрібнозернисті й становлять собою суміш різних форм фериту. В тілі зерна переважно наявний голчастий ферит із співвідношенням сторін 1:(3...8), у тому числі й з ділянками, що характеризуються високим кутом розорієнтування зерен за типом «плетіння корзини». Виявлені також внутризенистий полігональний ферит і виділення МАК-фази. Доля міжзеренного полігонального фериту за висотою швів коливається в межах 5...8% у верхній частині шва і 15...18% у його середній та нижній частинах. Цей тип фериту виділяється по вторинним межам у вигляді суцільних прошарувань шириною 0,006...0,013 мм ланцюжків або скупчень окремих зерен і ділянок бокового пластинчастого фериту, часто із виділеннями МАК-фази пластинчастого типу. Твердість металу швів складає HV_{0,5} – 226...235. В зоні вторинного нагріву шва першого проходу, яка межує із зоною проплавлення, наявні зерна первинного аустеніту 4–6 балу із оторочками межзеренного полігонального фериту. Довжина цієї зони дорівнює 0,16...0,33 мм. За зоною крупного зерна йде зона нормалізації розміром 0,33...0,39 мм, що складається в основному із зерен полігонального фериту, різної морфології виділень перліту і МАК-фази зернистого типу. Вигляд мікроструктур металу швів двох проходів наведений на рис. 4.

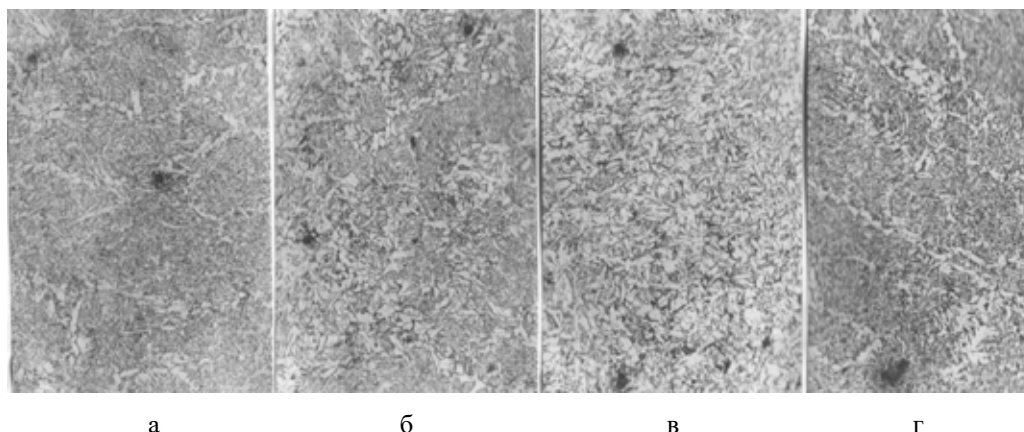


Рис. 4. Мікроструктура металу швів першого і другого проходів, $\times 500$: (а) – метал шва другого проходу; (б) – ЗКЗ в металі шва першого проходу; (в) – зона нормалізації в металі шва першого проходу; (г) – метал шва першого проходу

У зразку наведеному на рис. 3, структура металу зони крупного зерна (ЗКЗ), яка безпосередньо межує із литим металом швів, являє собою верхній бейніт із окремими ділянками мартенситу із розміром зерна 4–5 балу. Феритні прошарки по границях зерен практично відсутні. Довжина ЗКЗ змінюється в межах 0,26...0,91 мм. Твердість металу цієї зони знаходиться в межах HV0,5 – 258...293. Структура металу зони дрібного зерна (ЗДЗ) складається із суміші дрібних (7–11 балу) зерен бейніту, фериту і рідких виділень мартенситу і перліту. Довжина цієї зони складає 0,91...2,34 мм. Структура металу зони часткової перекристалізації (ЗЧП), що має довжину 0,39...1,04 мм, формується з розрихлених сфероїдизованих зерен перліту і зерен фериту. Вигляд мікроструктур окремих ділянок ЗТВ шва другого проходу показаний на рис. 5.

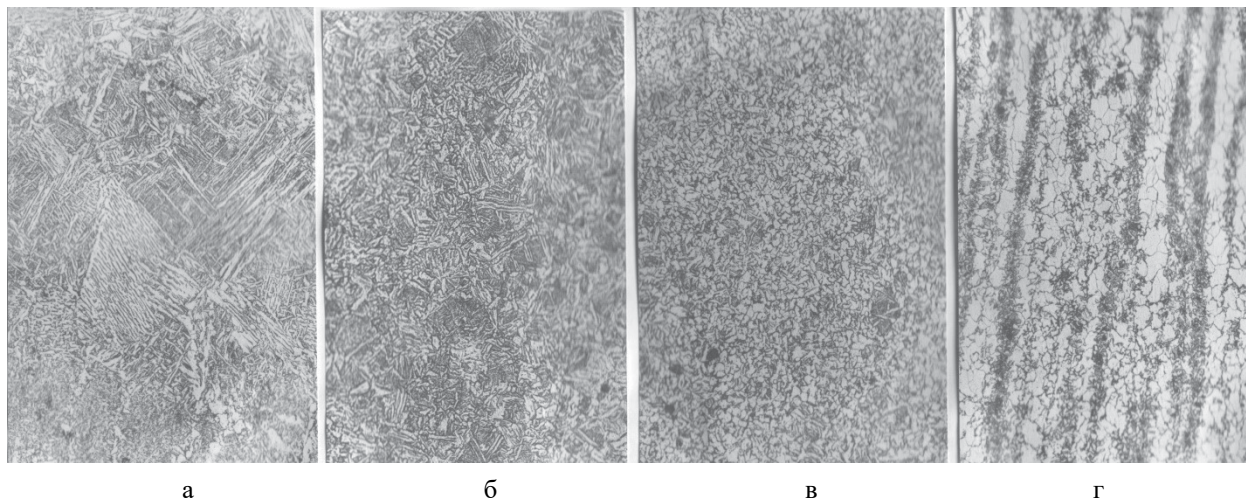


Рис. 5. Мікроструктура металу ЗТВ, $\times 500$: (а) – зона крупного зерна; (б,в) – зона дрібного зерна; (г) – зона часткової перекристалізації

Крім зварювання стиків досліджувалося також питання лазерного й гібридного зварювання кореневого шва. Було встановлено, що для одержання якісного валика зворотного підсилення при зварюванні такого шва, проведеного з боку розробки, остання повинна бути U-подібною або прямокутною (рис. 6).

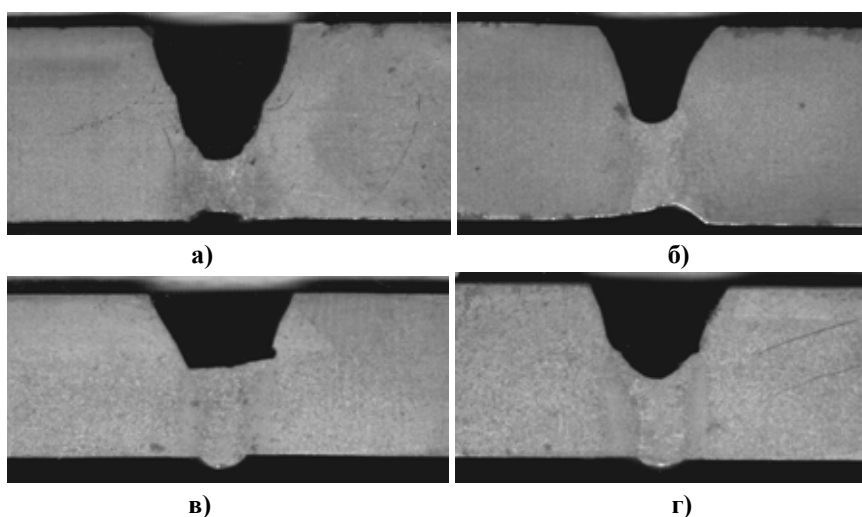


Рис. 6. Лазерне зварювання кореневого шву на сталі 13Г1С-У ($\delta=14,3$ мм): (а) і (б) – з V-подібною розробкою; (в) і (г) – з U-подібною розробкою; (а) і (г) – без присаджувального дроту; (б) і (в) – з дротом Св-08Г2С $\varnothing 1,2$ мм ($P=4,4$ кВт, $VЗВ=16$ м/год)

У випадку Y-подібною розробки відбувається утягування металу шва, що є дефектом формування з'єднання. Завдання значно спрощується у випадку зварювання з боку притуплення (з боку, протилежному розробці). У зв'язку із цим нами запропонований технологічний прийом одержання якісного зворотного підсилення, що представляє собою лазерне зварювання, яке проводиться відповідно до показаної на рис. 7 схеми. За цією схемою притуплення величиною 5...7 мм зварюється випромінюванням CO_2 -лазера потужністю до 5 кВт без використання присаджувального дроту. Такий технологічний прийом дозволяє одержувати підсилення висотою порядку

0,5...1,0 мм за рахунок збільшення об'єму переплавленого металу. При цьому структура металу шва й ЗТВ є дрібнозернистою й має підвищену стійкість до корозії, що є важливим моментом, оскільки такий шов пропонується виконувати усередині труби, тобто в місці контакту з агресивним середовищем. При використанні пропонованого технологічного прийому припустимий зазор між кромками, що зварюються, повинен становити 0,1...0,3 мм.

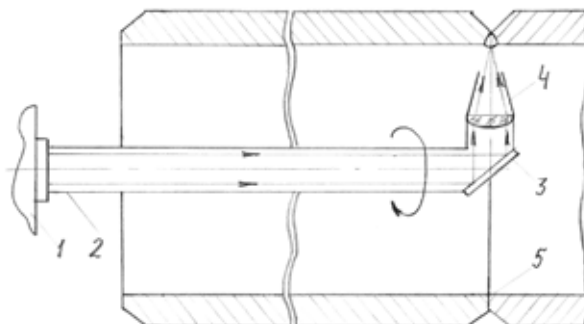


Рис. 7. Схема орбітального зварювання кореневого шва для монтажу трубних стиків:
 1 – CO₂-лазер; 2 – обертальний променепровід; 3 – поворотне дзеркало;
 4 – лазерна зварювальна головка; 5 – неповоротний трубний стик

Корозійні випробування отриманих за 3–5 проходів лазерним, лазерно–дуговим і дуговим зварюванням зразків зі сталі 13Г1С–У ($\delta=14,3$ мм) проводили шляхом холодного хімічного травлення в 6%-ному розчині азотної кислоти. При їхньому проведенні оцінювали час витравлювання міжкристалічних ділянок швів і ЗТВ до певної глибини. У результаті було встановлено, що найкращу стійкість до розтравлювання мають з'єднання, виконані лазерним зварюванням, а найгіршу – дуговим. Гібридне зварювання займає проміжне положення.

Проведені за методом Шарпі (на зразках з гострим надрізом при -20°C) виміри ударної в'язкості KCV [Дж/см²] показали наступне (рис. 8). У випадку двопрхідного лазерно–дугового зварювання метал шва має значно більшу ударну в'язкість у порівнянні з основним металом, ніж при чотирьохпрхідному зварюванні. Метал ЗТВ навпроти, при чотирьохпрхідному зварюванні має дещо більшу в'язкість, ніж при двопрхідному (порівняно з основним металом). Це можна пояснити тим, що при чотирьохпрхідному зварюванні кожний наступний прохід термічно впливає на попередній, а при виконуваний із двох сторін зразка двопрхідного – такий вплив майже виключається. Таким чином, при чотирьохпрхідному зварюванні відбувається перекристалізація металу шва й нормалізація ЗТВ, а при двопрхідному – переважно зберігаються ті структури, які первинно утворилися при зварюванні. Це підтверджують і металографічні дослідження. Так, у металі шва й ЗТВ чотирьохпрхідного зразка (рис. 2) переважають ферито-перлітні структури. Подібні структури спостерігаються й у металі шва двопрхідного зразка (рис. 3). Однак у ЗТВ останнього є ділянки верхнього бейніту й мартенситу, що сприяє підвищенню твердості в цих областях понад граничні значення НВ 260–280, умовно показаних на рис. 9 товстою горизонтальною лінією.

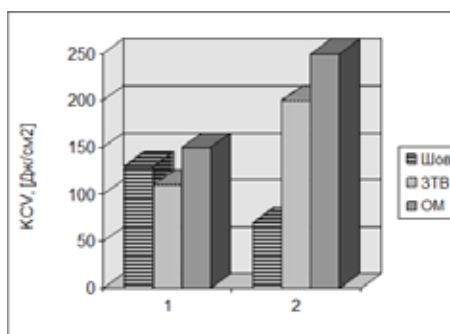


Рис. 8. Результати виміру ударної в'язкості KCV [Дж/см²] при -20°C у швах і ЗТВ зразків:
 1 – зі сталі 13Г1С–У ($d=14,3$ мм), зварених гібридним способом за два проходи;
 2 – зі сталі 10Г2ФБ ($d=19$ мм), зварених гібридним способом за чотири проходи

Відзначимо, що найбільша твердість спостерігається в місці переходу зони крупного зерна (ЗКЗ) до зони дрібного зерна (ЗДЗ) (рис. 9). Це місце варто вважати найбільш критичним до ударних і циклічних навантажень. Саме тому зразки для виміру ударної в'язкості, значення якої наведені на рис.6, намагалися виконувати так, щоб гострий надріз доводився в цій зоні.

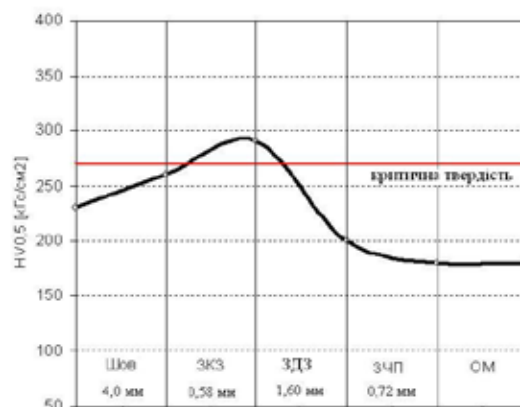


Рис. 9. Розподіл твердості HV0,5 (навантаження 0,5 кГс) у литому металі шва й у ЗТВ при двопротічному зварюванні сталі 13Г1С-У ($\delta=14,3$ мм): ЗКЗ – зона крупного зерна; ЗДЗ – зона дрібного зерна; ЗЧП – зона часткової перекристалізації; ОСМ – основний метал

Отримані авторами результати свідчать про те, що не дивлячись на досить високі досягнуті значення ударної в'язкості необхідні подальші дослідження, спрямовані на зниження твердості ЗТВ при гібридному лазерно-дуговому зварюванні. При лазерному зварюванні існує небезпека утворення гартівних структур як у ЗТВ, так і в литому металі шва. У даний час питання, пов'язані з допустимістю таких структур (у зв'язку з їх дрібнодисперсністю й пластичністю) або їхнім усуненням (за рахунок наступної термообробки або застосування додаткових технологічних прийомів), перебувають на стадії досліджень.

Висновки

1. Дослідження структур, одержуваних у зварених з'єднаннях трубних сталей багатопротічним лазерним і лазерно-дуговим зварюванням, а також ударної в'язкості й корозійної стійкості цих з'єднань, дозволяють вважати перспективним застосування зазначених способів зварювання для підвищення ресурсу експлуатації трубопровідного транспорту. Так, лазерно-дугове зварювання трубних сталей дозволяє досягти значень ударної в'язкості при -20°C у швах до 80%, а у ЗТВ – до 70–80% відносно аналогічного показника для основного металу.

2. Гібридне лазерно-дугове зварювання трубних сталей дозволяє знизити потужність лазерного випромінювання, частково замінивши його більше дешевою потужністю електричної дуги з розрахунку 1 кВт дуги замість $\sim 0,5$ кВт лазерного випромінювання для $\delta > 5$ мм.

2. При потужностях лазерного випромінювання до 3 кВт застосування гібридного процесу зварювання сталей доцільно до товщини стінки $\delta=10$ мм, понад яку глибина проплавлення не зростає, незалежно від зниження швидкості зварювання. Для зварювання більших товщин доцільно використовувати випромінювання з більшими потужностями. У цих же цілях можливе застосування багатопротічного лазерного або гібридного зварювання.

3. При гібридному зварюванні ширина шва й ЗТВ збільшується у порівнянні з лазерним. Підвищення швидкостей зварювання й вмісту вуглецю в основному металі призводять до утворення в ЗТВ небажаних мартенситних структур. Для усунення цього недоліку дворазового перевищення дугової потужності в порівнянні з лазерною недостатньо.

4. Хоча додатковий тепловий вплив електричної дуги й дозволяє управляти термічним циклом процесу для одержання необхідних структур металу шва й ЗТВ, однак цей момент потрібно вивчати додатково.

Список використаної літератури

- Guillal, A., Abdelbaki, N., Gaceb, M., Bettayeb, M. Effects of martensite-austenite constituents on mechanical properties of heat affected zone in high strength pipeline steels-review. Chemical engineering transactions. 2018. № 70. P. 583-588. <https://doi.org/10.3303/CET1870098>
- Feng, Y., Ji, L., Chen, H., Jiang, J., Wang, X., Ren, Y., ... Li, S. Research progress and prospect of key technologies for high-strain line pipe steel and pipes. Natural Gas Industry B. 2021. Vol. 8. № 2. P. 146-153. <https://doi.org/10.1016/j.ngib.2020.09.015>
- Üstündağ, Ö., Gook, S., Gumenyuk, A., Rethmeier, M. Hybrid laser arc welding of thick high-strength pipeline steels of grade X120 with adapted heat input. Journal of Materials Processing Technology. 2020. Vol. 275. P. 116358. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116358>
- Qi, X., Di, H., Sun, Q., Wang, X., Chen, X., Gao, Y., Liu, Z. A comparative analysis on microstructure and fracture mechanism of X100 pipeline steel CGHAZ between laser welding and arc welding. Journal of Materials Engineering and Performance. 2019. T. 28. № 11. C. 7006-7015. <https://doi.org/10.1007/s11665-019-04412-5>
- Wang, G., Wang, J., Yin, L., Hu, H., Yao, Z. Quantitative correlation between thermal cycling and the microstructures of X100 pipeline steel laser-welded joints. Materials. 2019. Vol. 13. № 1. P. 121. <https://doi.org/10.3390/ma13010121>
- Ramakrishna R, V. S. M., Amrutha, P. H. S. L. R., Rahman Rashid, R. A., Palanisamy, S. Narrow gap laser welding (NGLW) of structural steels—a technological review and future research recommendations. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020. Vol. 111. № 7. P. 2277-2300. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06230-9>

7. Sharma, S. K., Maheshwari, S. (2017). 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. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.12.039>
8. Maksymov, S. Yu., Gavrilyuk, A. A., Krazhanovskiy, D. M. Development of the technology of semi-automatic arc welding for the conditions of overhaul and reconstruction of the linear part of the main gas pipelines of Ukraine. *The Paton Welding Journal*. 2020. № 11. P. 32-35. <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.11.07>
9. Makhenko, O. V., Milenin, O. S., Velikoivanenko, O. A., Rozyuka, G. P., Kozlitina, S. S., Pivtorak, N. I., Dzyubak, L. I. Numerical analysis of the features of limiting state of welded pipeline elements under ultra-low-cycle loading conditions. *The Paton Welding Journal*. 2021. № 1. P. 32-37. <https://doi.org/10.37434/tpwj2021.01.06>
10. Kuchuk-Yatsenko, S. I., Kazymov, B., Zagadarchuk, V., Didkovsky, A. Development of technology of combined joining of position butts of thick-walled pipes of high-strength steels. *The Paton Welding Journal*. 2015. № 10. P. 2-9. <https://doi.org/10.15407/tpwj2015.10.01>
11. Shelyagin V., Khaskin V., Bernatskyi A., Siora A., Sydorets V., Chinakhov D. Multi-pass laser and hybrid laser-arc narrow-gap welding of steel butt joints. *Materials Science Forum*. 2018. Vol. 927. P. 64-71. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.927.64>
12. Bachmann, M., Gumenyuk, A., Rethmeier, M. Welding with high-power lasers: Trends and developments. *Physics Procedia*. 2016. Vol. 83. P. 15-25. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2016.08.003>
13. Shelyagin, V. D., Khaskin, V. Yu., Bernatsky, A. V., Siora, A. V. Prospects of application of laser and hybrid technologies of welding steels to increase service life of pipelines. *The Paton Welding Journal*. № 10. P. 29-32.
14. Kratky, A., Schuöcker, D., Liedl, G. Processing with kW fibre lasers: advantages and limits. In *XVII International Symposium on Gas Flow, Chemical Lasers, and High-Power Lasers*. April 2009. Vol. 7131. P. 493-504. SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.816655>

References

1. Guillal, A., Abdelbaki, N., Gaceb, M., and Bettayeb, M., "Effects of martensite-austenite constituents on mechanical properties of heat affected zone in high strength pipeline steels-review", *Chemical engineering transactions*, vol. 70, pp. 583-588, August 2018, <https://doi.org/10.3303/CET1870098>.
2. Feng, Y., Ji, L., Chen, H., Jiang, J., Wang, X., Ren, Y., ... and Li, S., "Research progress and prospect of key technologies for high-strain line pipe steel and pipes", *Natural Gas Industry B*, vol. 8, no. 2, pp. 146-153, April 2021, <https://doi.org/10.1016/j.ngib.2020.09.015>.
3. Üstündağ, Ö., Gook, S., Gumenyuk, A., and Rethmeier, M., "Hybrid laser arc welding of thick high-strength pipeline steels of grade X120 with adapted heat input", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 275, p. 116358, January 2020, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116358>.
4. Qi, X., Di, H., Sun, Q., Wang, X., Chen, X., Gao, Y., and Liu, Z., "A comparative analysis on microstructure and fracture mechanism of X100 pipeline steel CGHAZ between laser welding and arc welding", *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 28, no. 11, pp. 7006-7015, November 2019, <https://doi.org/10.1007/s11665-019-04412-5>.
5. Wang, G., Wang, J., Yin, L., Hu, H., and Yao, Z., "Quantitative correlation between thermal cycling and the microstructures of X100 pipeline steel laser-welded joints", *Materials*, vol. 13, no. 1, p. 121, December 2019, <https://doi.org/10.3390/ma13010121>.
6. Ramakrishna R, V. S. M., Amrutha, P. H. S. L. R., Rahman Rashid, R. A., and Palanisamy, S., "Narrow gap laser welding (NGLW) of structural steels – a technological review and future research recommendations", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 111, no. 7, pp. 2277-2300, December 2020, <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06230-9>.
7. Sharma, S. K., and Maheshwari, S., "A review on welding of high strength oil and gas pipeline steels", *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, vol. 38, pp. 203-217, February 2017, <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.12.039>.
8. Maksymov, S. Yu., Gavrilyuk, A. A., and Krazhanovskiy, D. M., "Development of the technology of semi-automatic arc welding for the conditions of overhaul and reconstruction of the linear part of the main gas pipelines of Ukraine", *The Paton Welding Journal*, no. 11, pp. 32-35, November 2020, <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.11.07>.
9. Makhenko, O. V., Milenin, O. S., Velikoivanenko, O. A., Rozyuka, G. P., Kozlitina, S. S., Pivtorak, N. I., and Dzyubak, L. I., "Numerical analysis of the features of limiting state of welded pipeline elements under ultra-low-cycle loading conditions", *The Paton Welding Journal*, no. 1, pp. 32-37, January 2021, <https://doi.org/10.37434/tpwj2021.01.06>
10. Kuchuk-Yatsenko, S. I., Kazymov, B., Zagadarchuk, V., and Didkovsky, A., "Development of technology of combined joining of position butts of thick-walled pipes of high-strength steels", *The Paton Welding Journal*, no. 10, pp. 2-9, October 2015, <https://doi.org/10.15407/tpwj2015.10.01>.
11. Shelyagin V., Khaskin V., Bernatskyi A., Siora A., Sydorets V., Chinakhov D., "Multi-pass laser and hybrid laser-arc narrow-gap welding of steel butt joints", *Materials Science Forum*, vol. 927, pp. 64-71, July 2018, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.927.64>.
12. Bachmann, M., Gumenyuk, A., and Rethmeier, M., "Welding with high-power lasers: Trends and developments", *Physics Procedia*, vol. 83, pp. 15-25, September 2016, <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2016.08.003>
13. Shelyagin, V. D., Khaskin, V. Y., Bernatsky, A. V., and Siora, A. V., "Prospects of application of laser and hybrid technologies of welding steels to increase service life of pipelines", *The Paton Welding Journal*, no. 10, pp. 29-32, October 2010.
14. Kratky, A., Schuöcker, D., and Liedl, G. (2009, April). Processing with kW fibre lasers: advantages and limits. In *XVII International Symposium on Gas Flow, Chemical Lasers, and High-Power Lasers*, vol. 7131, pp. 493-504, SPIE, April 2009, <https://doi.org/10.1117/12.816655>.