

УДК 621.791.92

DOI [https://doi.org/10.15589/znп2023.1\(490\).6](https://doi.org/10.15589/znп2023.1(490).6)**DEVELOPMENT OF LASER WELDING OF HIGH-ALLOY STEEL LAP JOINTS UTILIZING PLUG WELDS****ВІДПРАЦЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЛАЗЕРНОГО ЗВАРЮВАННЯ НАПУСКОВОГО З'ЄДНАННЯ ВИСОКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ ПРОРІЗНИМ ШВОМ****Artemii V. Bernatskyi¹**

bernatskyi@paton.kiev.ua

ORCID: 0000-0002-8050-5580

Mykola V. Sokolovskyi¹

m_sokolovskyi@paton.kiev.ua

ORCID: 0000-0003-3243-5060

Oleksandr V. Siora¹

siora_ov@ukr.net

ORCID: 0000-0003-1927-790X

Volodymyr A. Lukashenko¹

z_lyk@ukr.net

ORCID: 0000-0002-9685-4654

Nataliia O. Shamsutdinova¹

shamsutaliia@gmail.com

ORCID: 0000-0002-3525-0080

Oleksandr O. Danyleiko^{1,2}

danyleiko.oleksandr@gmail.com

ORCID: 0000-0002-8501-0421

Valentyna I. Bondarieva¹

laser-77@online.ua

ORCID: 0000-0002-4745-0995

А.В. Бернацький¹,

канд. техн. наук, старший дослідник

М.В. Соколовський¹,

аспірант, провідний інженер

О.В. Сіора¹,

науковий співробітник

В.А. Лукашенко¹,

канд. техн. наук, науковий співробітник

Н.О. Шамсутдінова¹,

інженер

О.О. Данилейко^{1,2},

інженер-технолог І категорії

В.І. Бондарєва¹,

заступник завідувача відділу

*E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv¹**E.O. Paton Educational and Research Institute of Material Science and Welding,**National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv²**Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України, м. Київ¹**Навчально-науковий інститут матеріалознавства та зварювання імені Є.О. Патона Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ²*

Abstract. The purpose of the study is the refinement of laser welding of high-alloy steel lap joints utilizing plug welds. Measurements of control welding joints, types of quality control and testing, as well as their amount were designated according to DSTU EN ISO 15614-11:2016 «Specification and qualification of welding procedures for metallic materials – Welding procedure test – Part 11: Electron and laser beam welding». Welding modes of experimental samples were determined in an empirical manner. Selection criteria chosen was the grade of compliance to the requirements, set up by the current standards. Over the course of the work, visual and radiographic control, as well as metallographic studies, microhardness treatment and mechanical static tensile tests were carried out.

As a result, it was established, that during the production of control lap joints with 1,5 mm thick upper plate (made out of 12Kh18N10T steel) and 3 mm thick lower plate (made out of 09Kh16N4B steel), an increase of welding speed from 1000 mm/min to 3000...4000 mm/min leads to the decrease of total pore projection from 0.2% to 0.16%. The smallest amount of summary amount of pore projection (0,16%) was recorded at the moment, where focusing plane was moved 1 mm deeper in the direction of the metal. This value is almost 1,5 times smaller compared to results achieved during welding using similar speed and power values, but with focusing place location zeroed to the upper plane of the plate. In addition to that, a relatively greater stability in the formation of the 0.2...0.3mm thick upper weld reinforcement was

spotted during an increase of laser welding speed from 1000 mm/min to 6000 mm/min, at the laser emission power of 4.4 kW. During an increase of the welding speed, the width of the control lap welded joints with 1.5 mm thick upper plate and 3 mm thick lower plate changed in a non-linear fashion. However, in the cases, where welding was carried out with a $\Delta F = -1$ mm defocusing of the laser emission, the dependence between these values was more uniform.

According to the results of visual and radiographic control, metallographic studies and mechanical tests, the optimal modes of lap laser welding of samples, which allowed for creation of welded joints that correspond to «High B» grade of DSTU EN ISO 13919-1:2015 «Electron and Laser-Beam Welded Joints – Guidance on Quality Levels for Imperfections – Part 1: Steel», were chosen.

Key words: laser welding; high-alloy steels; lap joints; plug welds; technological modes; structure; mechanical characteristics.

Анотація. Метою даної роботи було відпрацювання технології лазерного зварювання напусткового з'єднання високолегованих сталей прорізним швом.

Відповідно до ДСТУ EN ISO 15614-11:2016 «Технічні умови та атестація технології зварювання металевих матеріалів. Випробування процесів зварювання. Частина 11. Електронно-променеве та лазерно-променеве зварювання», були визначені розміри контрольних зварних з'єднань, види контролю та випробувань, їх обсяги. Емпіричним шляхом визначали режими зварювання зразків. Критерієм відбору служили умови відповідності вимогам діючих стандартів. Проводили візуальний та радіографічний контроль, металографічні дослідження, вимірювання мікротвердості та механічні випробування на статичний розтяг.

Встановлено, що при виготовленні контрольних напусткових з'єднань з товщиною верхньої деталі 1,5 мм (виготовленої зі сталі 12X18H10T) та товщиною нижньої деталі 3,0 мм (виготовленої зі сталі 09X16H4Б), при збільшенні швидкості зварювання з 1000 мм/хв до 3000...4000 мм/хв сумарна кількість проєкцій пор зменшується з 0,2% до 0,16%. Найменше значення сумарної кількості проєкцій пор (0,16%) зафіксовано при заглибленні фокусуєної площини лінзи на 1 мм у метал зразка, що майже в 1,5 рази менше у порівнянні зі зварюванням з аналогічними параметрами по швидкості та потужності лазерного випромінювання, але з розташуванням фокусуєної площини лінзи у нульовому положенні. Окрім того, спостерігається відносно більша стабільність у формуванні підсилення (0,2...0,3 мм) верхнього валіка зварного з'єднання, при збільшенні швидкості лазерного зварювання з 1000 мм/хв до 6000 мм/хв, при значенні потужності лазерного випромінювання 4,4 кВт. При збільшенні швидкості зварювання, ширина шва у напусткових контрольних з'єднаннях з товщиною верхнього листа 1,5 мм та товщиною нижнього листа 3,0 мм змінюється нелінійно. Але для випадку зварювання з розфокусуванням лазерного випромінювання $\Delta F = -1$ мм, залежність носить більш рівномірний характер.

За результатами проведення візуального та радіографічного контролю, металографічних досліджень та механічних випробувань було обрано оптимальний режим лазерного зварювання зразків, який дозволяє одержати зварні з'єднання, що відповідають рівню якості «високий В», згідно з ДСТУ EN ISO 13919-1:2015 «Зварювання. З'єднання, виконані електронно-променевим та лазерним зварюванням. Настанова щодо оцінювання рівня якості залежно від дефектів. Частина 1. Сталь».

Ключові слова: лазерне зварювання; високолеговані сталі; напусткове з'єднання; прорізний шов; технологічні режими; структура; механічні властивості.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

В останні роки промисловість багатьох індустріально-розвинених країн швидко прогресує у ракетобудуванні, суднобудуванні, приладобудуванні, галузевому та точному машинобудуванні, тощо, за рахунок багатьох впливових факторів, одним з найважливіших серед яких є широке впровадження сучасних технологій обробки матеріалів при виготовленні складних просторових конструкцій. Цей процес відбувається як за рахунок модернізації існуючих технологій, так й за рахунок розробки зовсім нових [1-3].

В даний час, за даними авторів статті, для ринку лазерних технологій обробки матеріалів України характерно домінантне, в порівнянні з іншими технологіями, використання лазерного різання (близько 65% від загального ринку обробних комплексів).

З інших технологій лазерної обробки, найбільш затребуваними залишаються лазерна маркування (близько 15% від загального ринку обробних комплексів) і стрімко розвивається в останні роки технологія 3D-друку (близько 10% від загального ринку обробних комплексів). Ринок технологічних комплексів для процесів лазерного зварювання, термообробки, прошивки отворів і інших технологій, за даними авторів, не перевищує 10% від загального ринку обробних лазерних комплексів. Зміна ситуації, що склалася з «перекосом» запитів вітчизняного ринку обробних лазерних комплексів в сторону різання і приведення його до рівня світових стандартів, характерних для країн з розвинутою економікою, можливо шляхом вирішення низки завдань, однією з яких є розробка конкурентоспроможних на світовому ринку вітчизня-

них технологій та обладнання для лазерного зварювання різних матеріалів.

Задачею, що вирішувалась у даній роботі є відпрацювання технології лазерного зварювання напусткового з'єднання різнорідних високолегованих сталей прорізним швом. До галузей перспективних до впровадження технологій лазерного зварювання таких з'єднань, належать харчова, хімічна, атомна та ракетно-космічна промисловість, а також виготовлення сучасних високошвидкісних поїздів.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Промислове застосування лазерних зварювальних технологій стає все більш звичним у світовій практиці. Закордоном впровадження таких технологій розпочалося ще на початку 1980-х років. Існує багато прикладів промислового застосування лазерного обладнання і технологій, але в першу чергу це відноситься до автомобільної промисловості, де лазерне зварювання і паяння кузовних елементів є дуже поширеними [4-6]. Зокрема, зварювання кузовних елементів легкових автомобілів широко впроваджено на таких фірмах, як Audi, Volvo, Saab, Mercedes тощо. Наприклад, завдяки лазерному зварюванню в конструкції автомобілів Volvo для підвищення механічних властивостей введено тришарові каркаси [7].

Зварювання корпусів автомобілів зазвичай виконується за допомогою антропоморфних роботів [8-10]. При цьому, в останні роки для цього застосовуються потужні лазери нових типів з оптоволоконною передачею випромінювання – наприклад, волоконні та дискові лазери.

Спочатку частка лазерного зварювання в автомобільному корпусі була достатньо невеликою. Так, наприклад, на початку впровадження лазерного зварювання в корпусі автомобіля Audi A3 вона становила лише 11 метрів загальної довжини швів й була достатньо невеликою. У сучасних автомобілях загальна довжина швів виконаних лазером у середньому досягає 100 погонних метрів. [11]. Однак, простота застосування і легкість автоматизації лазерного зварювання поширюють межі його застосування. У зв'язку з цим зараз актуальними є розробки технологій лазерного зварювання, спрямовані на впровадження в галузі автомобілебудування.

МЕТА РОБОТИ

Мета роботи – відпрацювання технології лазерного зварювання напусткового з'єднання високолегованих сталей прорізним швом.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Відповідно до ДСТУ EN ISO 15614-11:2016 «Технічні умови та атестація технології зварювання металевих матеріалів. Випробування процесів зварю-

вання. Частина 11. Електронно-променеве та лазерно-променеве зварювання», були визначені розміри контрольних зварних з'єднань, види контролю та випробувань, їх обсяги.

Розміри заготовок для контрольних напусткових з'єднань: розмір пластин 300×100, з товщиною верхньої деталі 1,5 мм та товщиною нижньої деталі 3,0 мм. Для виготовлення заготовок товщиною 3,0 мм застосовувалася корозійностійка (нержавіюча) звичайна сталь 09X16H4Б, яка належить до мартенситного класу [12]. Для виготовлення заготовок товщиною 1,5 мм застосовувалася корозійностійка (нержавіюча) сталь 12X18H10T, яка належить аустенітного класу [12].

Заготовки зразків закріплювалися в струбціні і зварювалися у вертикальному просторовому положенні (згідно рис. 1). Зварний шов розташовувався уздовж ліній прокату.

Емпіричним шляхом визначали режими зварювання зразків. Критерієм відбору служили умови відповідності вимогам стандарту ДСТУ EN ISO 13919-1:2015 «Зварювання. З'єднання, виконані електронно-променевим та лазерним зварюванням. Настанова щодо оцінювання рівня якості залежно від дефектів. Частина 1. Сталь», а саме: відсутність від-



Рис. 1. Зовнішній вигляд лабораторного стенду для лазерного зварювання з'єднань з тонколистових нержавіючих сталей

хилень від заданої геометрії швів, відсутність дефектів у вигляді тріщин, несплавлення і т.п.

Були визначені режими, що відрізняються своїми технологічними параметрами, застосування яких дозволяє отримати контрольні зварні з'єднання, які задовольняють вимогам до геометрії, що наведені у ДСТУ EN ISO 13919-1:2015. На визначених режимах були зварені контрольні зразки на кожному з режимів по 3 штуки для порівняння повторюваності результатів.

Для кожного з одержаних контрольних зварних з'єднань проводили візуальний та радіографічний контроль. З кожного з контрольних з'єднань шляхом фрезерування готували по одному зразку для проведення випробувань на мікротвердість і металографічних досліджень.

Металографічні дослідження зварних зразків виконувалися відповідно до стандарту ISO 17639:2003 «Випробування з руйнуванням зразка зварних швів в металевих матеріалах. Макро- і мікроскопічне дослідження зварних швів». За допомогою оптичної мікроскопії та мікродюретричного аналізу, досліджено зразки, які відрізняються параметрами технологічних режимів. Дослідження проведені на різних ділянках кожного із зразків «зварний шов → ЗТВ → основний метал». Випробувальні зразки для металографічних досліджень готували, згідно ДСТУ-ЗТ ISO/TR 16060:2009 «Випробування зварних з'єднань металевих матеріалів руйнівні. Травлення для макро- і мікроскопічного дослідження», за допомогою фрезерування, шліфування, полірування на високошвидкісних полірувальних колах з використанням алмазних паст різної дисперсності. Виявлення структури зварних з'єднань проводили шляхом електролітичного травлення в 20% водному розчині хромової кислоти. Дослідження мікроструктури проводилося на металографічному мікроскопі «Neophot-32» при різних збільшеннях. Кількість α -фази вимірювали на приладі «Ferritgehaltmessr 1.053». Твердість фазових складових вимірювали на мікротвердомірі «М-400» фірми «LECO». Навантаження становило 1 Н, час витримки 10 с. Розмір аустенітного зерна визначали шляхом порівняння з еталонним шкалами ГОСТ 5639-82. Зображення мікроструктур було отримано за допомогою цифрової фотокамери «Olympus» та цифрової камери з окуляром «Sigeta LCMOS 10000 10.0MP».

Механічні випробування на статичний розтяг зварних зразків виконувалися на сервогидравлічній машині «MTS 318.25».

Візуальний контроль здійснювався на попередньо механічно очищених від забруднень зразках. Під час проведення візуального контролю використовувалося комбіноване (денний + місцеве за допомогою лампи розжарювання) освітлення – близько 1000 лк. Були використані наступні пристосування і інструменти:

лупи переглядові 4* і 10* крат, лупа вимірювальна 10* крат з точністю 0,1 мм, штангенциркуль ШЦІ40 (кл. 2), лінійка, вимірювач-профіломер портативний годинного типу з точністю 0,01 мм, мікроскоп портативний, люксметр Ю-116. За результатами візуального контролю оцінювалося: ширина шва; лускатість; наявність кратерів (усадовчих раковин в кратері); корінь шва і інші параметри, передбачені стандартом ДСТУ EN ISO 13919-1:2015.

Радіографічний контроль здійснювався на попередньо механічно очищених від забруднень зразках. Були використані: рентгенівський апарат – РАП 150/300; еталон чутливості – дротовий; плівка радіографічна – AGFA-D5, розмір 240×100 мм та 240×300 мм; металеві екрани, що підсилюють – Pb-0,027. Виконувався порівняльний аналіз окремих результатів радіографічного контролю (результати підрахунку сумарної площини виявлених пор; їх взаємного розташування; їх розміру та інших факторів, що впливають на оцінку рівня якості зварного з'єднання).

За результатами проведення візуального та радіографічного контролю, металографічних досліджень та механічних випробувань було обрано режим лазерного зварювання зразків, який дозволяє одержати зварні з'єднання, що відповідають рівню якості «високий В», згідно з ISO 13919-1:2015.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Параметри технологічних режимів лазерного зварювання змінювали у наступних межах: потужність лазерного випромінювання $P = 1,0 \dots 4,4$ кВт; швидкість зварювання $V = 500 \dots 7500$ мм/хв; величина розфокусування $\Delta F = \pm 6$ мм; витрати захисного газу (аргону) $5,0 \dots 20,0$ л/хв.

З метою визначення впливу параметрів режимів лазерного зварювання на характеристики одержаних з'єднань проведено аналіз одержаних результатів візуального, капілярного та радіографічного контролю, металографічних досліджень, випробувань на статичний розтяг. За результатами даного аналізу, одержано графічні залежності зміни характеристик одержаних з'єднань, в залежності від зміни найбільш впливових факторів (параметрів режимів).

Аналіз результатів проведених досліджень дозволив встановити, що при виготовленні контрольних напусткових з'єднань з товщиною верхньої деталі 1,5 мм (виготовленої зі сталі 12X18H10T) та товщиною нижньої деталі 3,0 мм (виготовленої зі сталі 09X16H4Б), при збільшенні швидкості зварювання з 1000 мм/хв до 3000...4000 мм/хв сумарна кількість проєкцій пор (загальна площа пор в повздовжньому перерізі по осі шва) зменшується з 0,2% (від загальної площі зварного з'єднання) до 0,16% (рис. 2).

Найменше значення сумарної кількості проєкцій пор (0,16%) зафіксовано при заглибленні фокусуєної площини лінзи на 1 мм у метал зразка, що майже

в 1,5 рази менше у порівнянні зі зварюванням з аналогічними параметрами по швидкості та потужності лазерного випромінювання, але з розташуванням фокусуючої площини лінзи у нульовому положенні (рис. 2).

Окрім того, спостерігається відносно більша стабільність у формуванні підсилення (0,2...0,3 мм) верхнього валіка зварного з'єднання, при збільшенні швидкості лазерного зварювання з 1000 мм/хв до 6000 мм/хв, при значенні потужності лазерного випромінювання 4,4 кВт (рис. 3).

Треба відзначити, що при збільшенні швидкості зварювання, ширина шва у напусткових контрольних з'єднаннях з товщиною верхнього листа 1,5 мм та товщиною нижнього листа 3,0 мм змінюється нелінійно, як показано на рис. 4. Але для випадку зварювання з розфокусуванням лазерного випромінювання «-1» мм, залежність носить більш стабільний характер.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

За результатами проведених досліджень, було визначено, що оптимальним режимом лазерного зварювання (з позиції відповідності вимогам рівня якості «високий В», згідно стандарту ДСТУ EN ISO 13919-1:2015) при виготовленні контрольних напусткових з'єднань з товщиною верхньої деталі 1,5 мм та товщиною нижньої деталі 3,0 мм є наступ-

ний (режим зразка № 1362.1): потужність лазерного випромінювання $P=4,4$ кВт; швидкість зварювання $V=3000$ мм/хв; величина розфокусування $\Delta F=-1$ мм; витрати захисного газу аргону $Ar=20$ л/хв. Це дозволило рекомендувати саме цей режим для використання при зварюванні напусткових з'єднань заготовок відповідних товщин. Далі наведено дослідження структурних особливостей зразка звареного на оптимальному режимі № 1362.1.

За результатами металографічних досліджень встановлено, що основний метал досліджуваних зварних з'єднань має структуру що складається з аустенітної матриці і невеликої кількості δ -фериту. Для зразків зі сталі 12X18H10T товщиною 1,5 мм – до 6%, для зразків зі сталі 09X16H4B товщиною 3 мм – до 3%. Структура основного металу обох сталей дисперсна (бал аустенітного зерна для зразків зі сталі 12X18H10T 1,5 мм – № 10, для зразків сталі 09X16H4B 3 мм – № 9) з яскраво вираженою текстурою прокату. Твердість основного металу зі сталі 12X18H10T – HV1 1870...1930 МПа. Твердість основного металу зі сталі 09X16H4B – HV1 2280...2360 МПа.

Загальний вигляд структури у напустковому зварному з'єднанні № 1362.1, яке складається зі сталей 12X18H10T (верхня пластина товщиною 1,5 мм) та 09X16H4B (нижня пластина товщиною 3,0 мм), наведено на рис. 5.

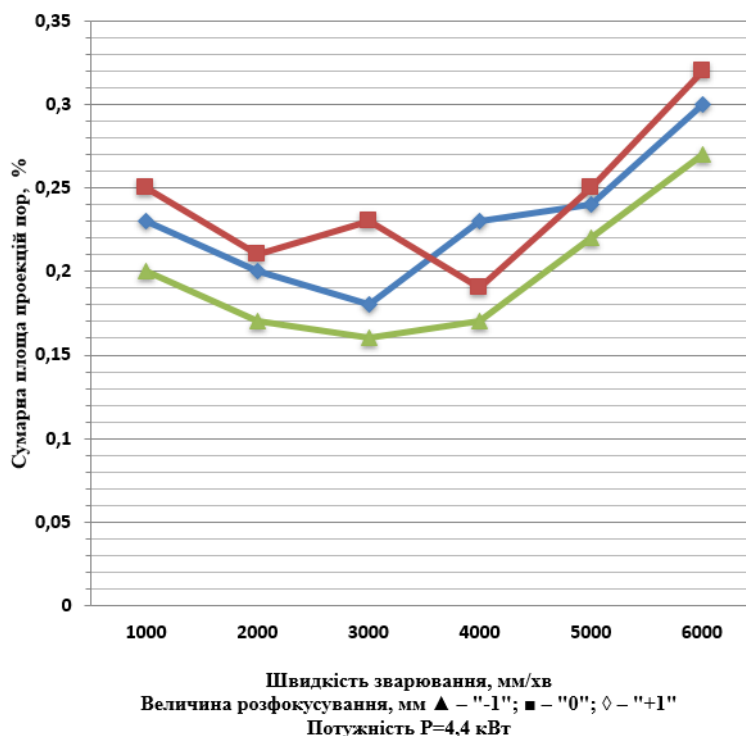


Рис. 2. Графічні залежності впливу параметрів режимів лазерного зварювання на зміну сумарної площі проєкцій пор, при виготовленні контрольних напусткових з'єднань з товщиною верхньої деталі 1,5 мм (виготовленої зі сталі 12X18H10T) та товщиною нижньої деталі 3,0 мм (виготовленої зі сталі 09X16H4B)

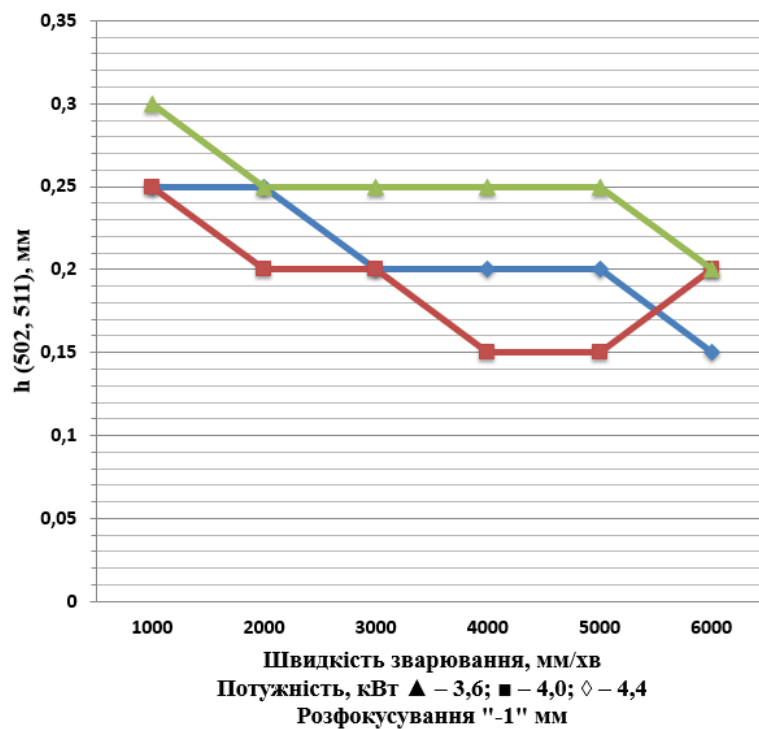


Рис. 3. Графічні залежності впливу параметрів режимів лазерного зварювання на підсилення верхнього валіка зварного з'єднання, при виготовленні контрольних напусткових з'єднань з товщиною верхньої деталі 1,5 мм (виготовленої зі сталі 12X18H10T) та товщиною нижньої деталі 3,0 мм (виготовленої зі сталі 09X16H4Б)

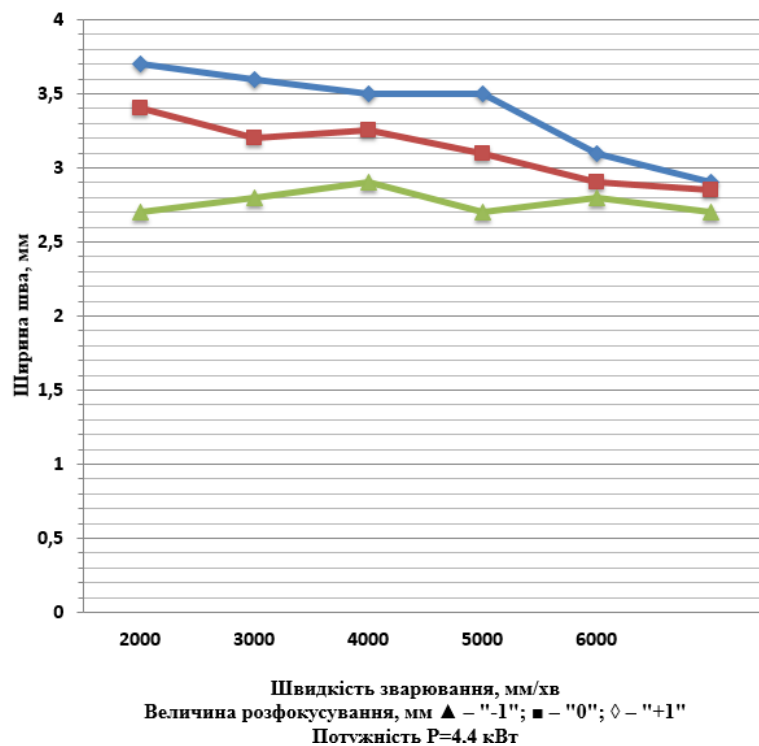


Рис. 4. Графічні залежності впливу параметрів режимів лазерного зварювання на зміну ширини зварного з'єднання, при виготовленні контрольних напусткових з'єднань з товщиною верхньої деталі 1,5 мм (виготовленої зі сталі 12X18H10T) та товщиною нижньої деталі 3,0 мм (виготовленої зі сталі 09X16H4Б)

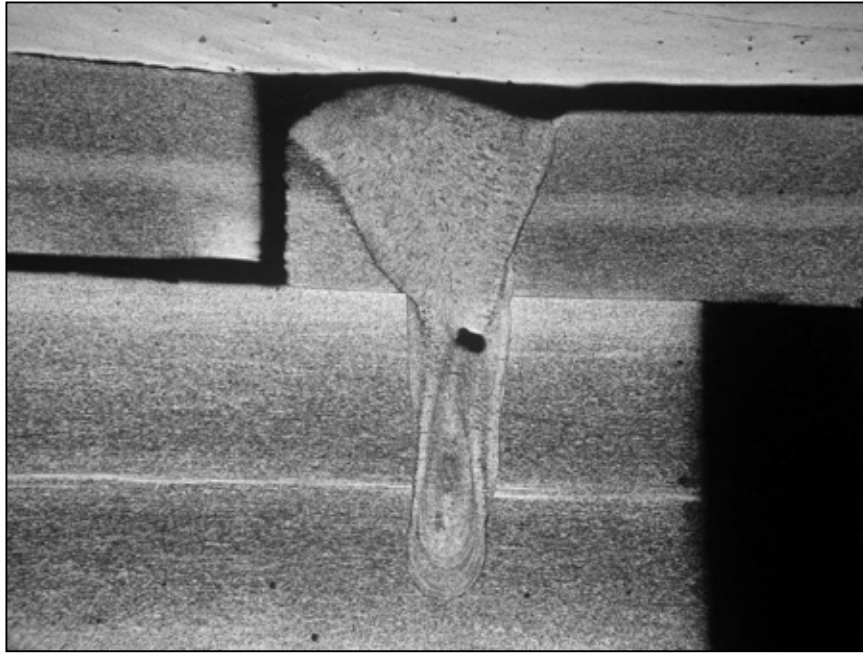


Рис. 5. Фотографія структури у напустковому зварному з'єднанні № 1362.1, загальний вигляд, $\times 25$

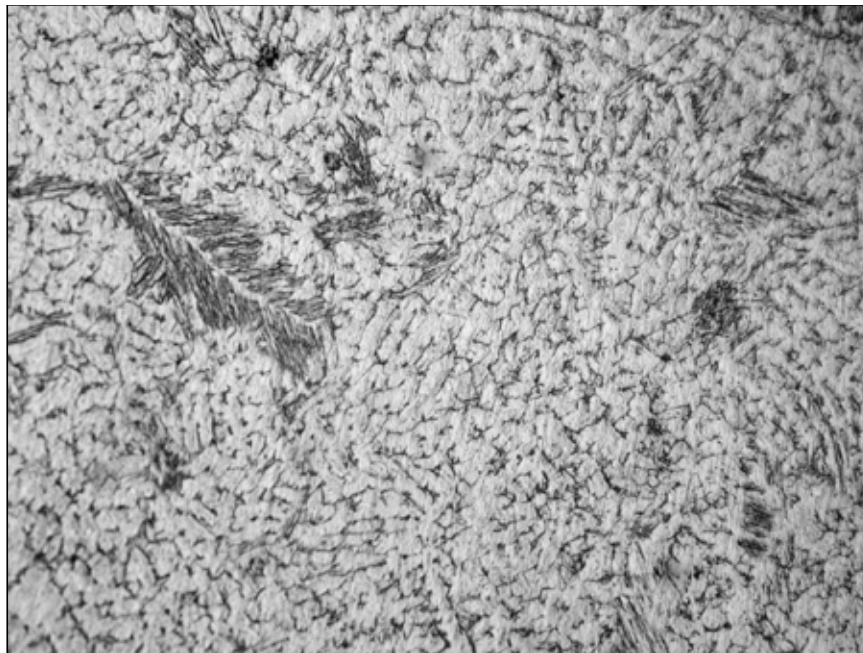


Рис. 6. Фотографія мікроструктури у верхній частині напусткового зварного з'єднання № 1362.1, $\times 400$

Структура у зварному з'єднанні № 1362.1 містить аустеніт і δ -ферит. δ -ферит спостерігається в основному у вигляді дисперсних виділень рівномірно розташованих в аустеніті, також зустрічаються компактні скупчення δ -фериту (рис 6).

Твердість металу шва у напустковому зварному з'єднанні № 1362.1 коливається в межах HV1 2400...2800 МПа. Твердість ділянок δ -фериту становить HV1 2540...2600 МПа.

Шов складається з декількох шарів (рис. 2), які відрізняються дисперсністю структури і травимістю, що свідчить про різне тепловідведення і, можливо, про різний хімічний склад в різних ділянках шва (рис. 3). Лінія сплавлення у напустковому зварному з'єднанні № 1362.1 чітко виражена, без дефектів (рис. 7).

Зона термічного впливу у напустковому зварному з'єднанні № 1362.1, структурно не відрізняється від



Рис. 7. Фотографія мікроструктури в області лінії сплавлення у верхній частині напусткового зварного з'єднання № 1362.1, $\times 400$

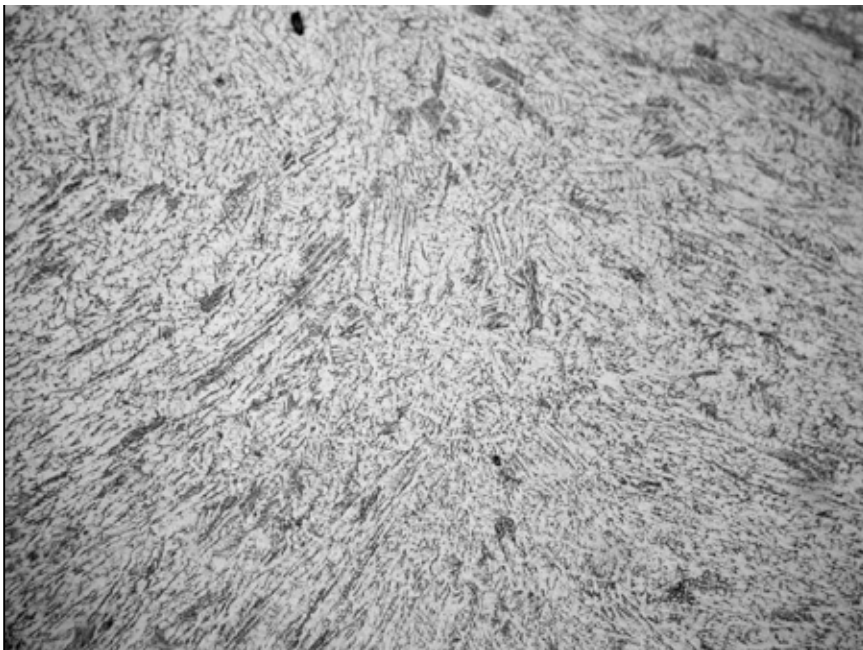


Рис. 8. Фотографія мікроструктури в центральній частині шва напусткового зварного з'єднання № 1362.1, $\times 200$

основного металу, і являє собою аустенит і δ -ферит зі збереженням текстури прокату. Твердість металу ЗТВ вище на вузькій ділянці і складає – HV1 2450 МПа на широкій ділянці і HV1 2850...2970 МПа на вузькій ділянці шва. На поперечному перерізі зразка в нижній половині шва спостерігається одиночна пора (рис. 5).

Структура металу шва у напустковому зварному з'єднанні № 1362.1 лита, комірчаста в центрі шва,

і складається з стовпчастих кристалітів, витягнутих у напрямку тепловідводу, ближче до лінії сплавлення (рис. 8 та рис. 9).

Структура шва у напустковому зварному з'єднанні № 1362.1 двухфазна аустенитна з невеликим (до 2,5%) вмістом δ -фериту. Твердість металу шва становить: HV1 2000...2600 МПа. Зона термічного впливу у напустковому зварному з'єднанні № 1362.1 не вира-

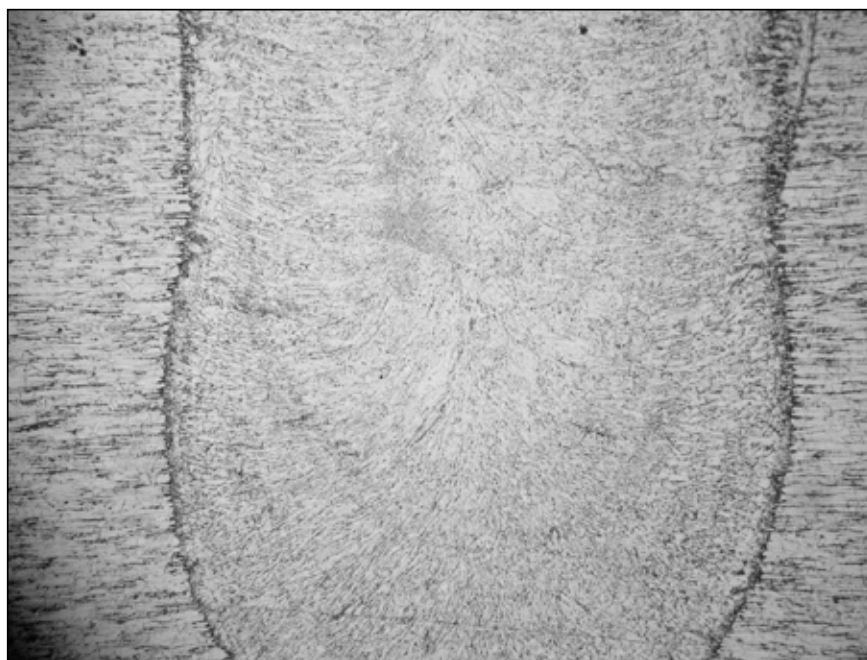


Рис. 9. Фотографія мікроструктури у прикореневій частині шва напусткового зварного з'єднання № 1362.1, $\times 200$

жена. Структура в ЗТВ не відрізняється від структури основного металу і являє собою аустеніт і невелику кількість δ -фериту.

Випробування на розтяг основного матеріалу сталі 12X18H10T товщиною 1,5 мм, проводили відповідно до ГОСТ 6996-66 «Зварні з'єднання. Методи визначення механічних властивостей» на універсальній сервогідравлічній машині «MTS-318.25», в нормальних умовах ($t=20^{\circ}\text{C}$). Швидкість переміщення захвату 10 мм/хв.

В ході проведення випробувань отримані експериментальні данні зусилля руйнування ($P_{\max}$), тимчасового опору розриву σ_b (МПа). Одержані характеристики наведені у Таблиці 1.

Таблиця 1. Результати випробувань на статичний розтяг зразків зі сталі 12X18H10T товщиною 1,5 мм

№	σ_b , МПа	$P_{\max}$, Н
1.1	662	14395
1.2	668	14534
1.3	670	14562
1.4	663	14412
1.5	670	14582
1.6	668	14534

В Таблиці 2 наведені результати випробувань на статичний розтяг зразка № 1362.1.

Порівняння даних Таблиці 2 та Таблиці 3 показує, що значення навантаження при якому відбувалося руйнування зварних з'єднань зварених на режимі № 1362.1 близькі до значень навантажень, при яких відбувалось руйнування зразків основного матеріалу

Таблиця 2. Результати випробувань на статичний розтяг зразків зварних з'єднань зварених на режимі № 1362.1

№ зразка	$P_{\max}$, Н
1.1	14527
1.2	15553
1.3	15830
1.4	15506
1.5	15666
1.6	16698
1.7	15987

сталі 12X18H10T. Ці результати дозволяють стверджувати, що механічні властивості отриманих на режимі № 1362.1 зварних з'єднань задовольняють вимогам стандартів, що пред'являються до зварних з'єднань, отриманим зварюванням плавленням.

ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що при виготовленні контрольних напусткових з'єднань з товщиною верхньої деталі 1,5 мм (виготовленої зі сталі 12X18H10T) та товщиною нижньої деталі 3,0 мм (виготовленої зі сталі 09X16H4Б), при збільшенні швидкості зварювання з 1000 мм/хв до 3000...4000 мм/хв сумарна кількість проєкцій пор зменшується з 0,2% до 0,16%.

2. Найменше значення сумарної кількості проєкцій пор (0,16%) зафіксовано при заглибленні фокусуючої площини лінзи на 1 мм у метал зразка, що майже в 1,5 рази менше у порівнянні зі зварюванням з аналогічними параметрами по швидкості та потужності лазерного випромінювання, але з роз-

ташуванням фокусуєної площини лінзи у нульовому положенні.

3. Спостерігається відносно більша стабільність у формуванні підсилення (0,2...0,3 мм) верхнього валіка зварного з'єднання, при збільшенні швидкості лазерного зварювання з 1000 мм/хв до 6000 мм/хв, при значенні потужності лазерного випромінювання 4,4 кВт.

4. При збільшенні швидкості зварювання, ширина шва у напусткових контрольних з'єднаннях з товщиною верхнього листа 1,5 мм та товщиною нижнього листа 3,0 мм змінюється нелінійно. Але для випадку зварювання з розфокусуванням лазерного

випромінювання $\Delta F = -1$ мм, залежність носить більш рівномірний характер.

5. Оптимальним режимом лазерного зварювання (з позиції відповідності вимогам рівня якості «високий В», згідно стандарту ДСТУ EN ISO 13919-1:2015) при виготовленні контрольних напусткових з'єднань з товщиною верхньої деталі 1,5 мм та товщиною нижньої деталі 3,0 мм є наступний: потужність лазерного випромінювання $P=4,4$ кВт; швидкість зварювання $V=3000$ мм/хв; величина розфокусування $\Delta F=-1$ мм; витрати захисного газу аргону $Ar=20$ л/хв. Це дозволяє рекомендувати саме цей режим для використання при зварюванні напусткових з'єднань заготовок відповідних товщин.

REFERENCES

- [1] Bandyopadhyay, A., & Heer, B. (2018). Additive manufacturing of multi-material structures. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 129, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2018.04.001>
- [2] Katz-Demyanetz, A., Popov Jr, V. V., Kovalevsky, A., Safranchik, D., & Koptioug, A. (2019). Powder-bed additive manufacturing for aerospace application: Techniques, metallic and metal/ceramic composite materials and trends. *Manufacturing review*, 6, 5. <https://doi.org/10.1051/mfreview/2019003>
- [3] Cunningham, C. R., Flynn, J. M., Shokrani, A., Dhokia, V., & Newman, S. T. (2018). Invited review article: Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 22, 672-686. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.06.020>
- [4] Hong, K. M., & Shin, Y. C. (2017). Prospects of laser welding technology in the automotive industry: A review. *Journal of Materials Processing Technology*, 245, 46-69. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.02.008>
- [5] Fysikopoulos, A., Pastras, G., Stavridis, J., Stavropoulos, P., & Chrysosolouris, G. (2016). On the performance evaluation of remote laser welding process: an automotive case study. *Procedia Cirp*, 41, 969-974. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.005>
- [6] Perka, A. K., John, M., Kuruveri, U. B., & Menezes, P. L. (2022). Advanced high-strength steels for automotive applications: arc and laser welding process, properties, and challenges. *Metals*, 12(6), 1051. <https://doi.org/10.3390/met12061051>
- [7] Palmquist, N., & Salmi, T. (2008). Application report-Volvo C70 laser challenge-Laser welding and brazing improve auto-component manufacture. *Industrial Laser Solutions for Manufacturing*, 23(4), 8.
- [8] Kim, C. H., Choi, T. Y., Lee, J. J., Suh, J., Park, K. T., & Kang, H. S. (2019). Study of Intelligent Vision Sensor for the Robotic Laser Welding. *Journal of The Korean Society of Industry Convergence*, 22(4), 447-457. <https://doi.org/10.21289/KSIC.2019.22.4.447>
- [9] Machado, M. A., Rosado, L. F. S. G., Mendes, N. A. M., Miranda, R. M. M., & dos Santos, T. J. G. (2021). New directions for inline inspection of automobile laser welds using non-destructive testing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 118, 1183-1195. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08007-0>
- [10] Kampker, A., Bergweiler, G., Hansen, J. O., & Borbola, W. J. (2017). Jigless laser welding in the car body production. *ATZ worldwide*, 119(2), 72-75. <https://doi.org/10.1007/s38311-016-0169-3>
- [11] Petring, D. (2004). Laser applications in European automotive manufacturing: Historical review and recent trends. *Journal of the Japan Welding Society*, 73(8), 539-546. <https://doi.org/10.2207/qjjws1943.73.539>
- [12] Sorokin, V. G., Volosnikova, A. V., & Vyatkin, S. A. (1989). *Marochnik stalej i splavov [Marker of steels and alloys]*. Moscow: Mashinostroenie. [in Russian]

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Bandyopadhyay, A., & Heer, B. (2018). Additive manufacturing of multi-material structures. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 129, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2018.04.001>
- [2] Katz-Demyanetz, A., Popov Jr, V. V., Kovalevsky, A., Safranchik, D., & Koptioug, A. (2019). Powder-bed additive manufacturing for aerospace application: Techniques, metallic and metal/ceramic composite materials and trends. *Manufacturing review*, 6, 5. <https://doi.org/10.1051/mfreview/2019003>
- [3] Cunningham, C. R., Flynn, J. M., Shokrani, A., Dhokia, V., & Newman, S. T. (2018). Invited review article: Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 22, 672-686. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.06.020>
- [4] Hong, K. M., & Shin, Y. C. (2017). Prospects of laser welding technology in the automotive industry: A review. *Journal of Materials Processing Technology*, 245, 46-69. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.02.008>
- [5] Fysikopoulos, A., Pastras, G., Stavridis, J., Stavropoulos, P., & Chrysosolouris, G. (2016). On the performance evaluation of remote laser welding process: an automotive case study. *Procedia Cirp*, 41, 969-974. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.005>

- [6] Perka, A. K., John, M., Kuruveri, U. B., & Menezes, P. L. (2022). Advanced high-strength steels for automotive applications: arc and laser welding process, properties, and challenges. *Metals*, 12(6), 1051. <https://doi.org/10.3390/met12061051>
- [7] Palmquist, N., & Salmi, T. (2008). Application report-Volvo C70 laser challenge-Laser welding and brazing improve auto-component manufacture. *Industrial Laser Solutions for Manufacturing*, 23(4), 8.
- [8] Kim, C. H., Choi, T. Y., Lee, J. J., Suh, J., Park, K. T., & Kang, H. S. (2019). Study of Intelligent Vision Sensor for the Robotic Laser Welding. *Journal of The Korean Society of Industry Convergence*, 22(4), 447-457. <https://doi.org/10.21289/KSIC.2019.22.4.447>
- [9] Machado, M. A., Rosado, L. F. S. G., Mendes, N. A. M., Miranda, R. M. M., & dos Santos, T. J. G. (2021). New directions for inline inspection of automobile laser welds using non-destructive testing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 118, 1183–1195. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08007-0>
- [10] Kampker, A., Bergweiler, G., Hansen, J. O., & Borbola, W. J. (2017). Jigless laser welding in the car body production. *ATZ worldwide*, 119(2), 72-75. <https://doi.org/10.1007/s38311-016-0169-3>
- [11] Petring, D. (2004). Laser applications in European automotive manufacturing: Historical review and recent trends. *Journal of the Japan Welding Society*, 73(8), 539-546. <https://doi.org/10.2207/qjwjs1943.73.539>
- [12] Сорокин, В. Г., Волосникова, А. В., & Вяткин, С. А. (1989). Марочник сталей и сплавов. Москва: Машиностроение.

© А. В. Бернацький, М. В. Соколовський, О. В. Сіора, В. А. Лукашенко, Н. О. Шамсутдінова, О. О. Данилейко, В. І. Бондарева
Дата надходження статті до редакції: 01.04.2023
Дата затвердження статті до друку: 10.04.2023