

УДК 621.791.92

DOI [https://doi.org/10.15589/znп2023.2-3\(491-492\).5](https://doi.org/10.15589/znп2023.2-3(491-492).5)DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY OF LASER WELDING
OF BUTT JOINTS OF STEEL 30KHGSAВІДПРАЦЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЛАЗЕРНОГО ЗВАРЮВАННЯ
СТИКОВИХ З'ЄДНАНЬ СТАЛІ 30ХГСА**Artemii V. Bernatskyi¹**

bernatskyi@paton.kiev.ua

ORCID: 0000-0002-8050-5580

Oleksandr V. Siora¹

siora_ov@ukr.net

ORCID: 0000-0003-1927-790X

Mykola V. Sokolovskyi¹

m_sokolovskyi@paton.kiev.ua

ORCID: 0000-0003-3243-5060

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

А. В. Бернацький¹,

канд. тех. наук, старший дослідник

О. В. Сіора¹,

науковий співробітник

М. В. Соколовський¹,

аспірант, провідний інженер

Н. О. Шамсутдінова¹,

інженер-технолог II категорії

О. О. Данилейко^{1,2},

інженер-технолог I категорії

¹*E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv*²*E. O. Paton Educational and Research Institute of Material Science and Welding,**National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv*¹*Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України, м. Київ*²*Навчально-науковий інститут матеріалознавства та зварювання імені Є.О. Патона Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ*

Abstract. A peculiarity of welding high-strength steels is their sensitivity to overheating with deterioration of the metal properties of the thermally affected zone, the tendency to the formation of cold cracks in the overheating area or in the seam where the metal is hardened during welding, and the occurrence of weakening zones outside the hardening areas. The purpose of this work is to find the possibility of improving the quality and properties of butt joints of 30KhGSA steel while ensuring increased productivity of welding works by using laser welding. High-quality welded joints of high-strength steels, at least 3.0 and 6.0 mm thick, can be performed using laser radiation. The high speed of laser welding, which is several or many times higher than that of arc welding, results in obtaining seams of a much smaller width without excessive sagging of the metal. During laser welding in an environment of CO₂, Ar, He, their mixture, and N₂, the penetration depth of 30KhGSA steel does not change significantly. During laser welding in an environment of inert gases, better joint formation is achieved, but at the same time, the formation of pores is possible. The use of activating flux VS-31 during laser welding is not effective. It was established that laser welding involves high heating rates (700...1200 °C/s and more), short-term, for a few seconds, stay at temperatures of intensive grain growth and high cooling rates $W_{6/5}=10...80$ °C/s depending on the thickness of the steel and the welding mode. Butt joints of steel 30KhGSA, made by laser welding, are characterized by increased hardness of the weld metal (less in the middle part) and adjacent areas of the HAZ and the presence of weakened areas of the HAZ, especially thermally strengthened steel, at a distance of 0.8...1.5 mm from the seam. The absence of cold cracks indicates a low susceptibility to cracking of such joints. To reduce the hardness, improve the plasticity of the metal and prevent cracking, it is advisable to subject welded joints to additional heat treatment. The obtained data can be used in the development of technologies for laser welding of various products, in particular pressure vessels, made of high-strength steels.

Key words: 30KhGSA steel; laser welding; butt-welded joints; shielding gas.

Анотація. Особливістю зварювання високоміцних сталей є чутливість їх до перегрівання з погіршенням властивостей металу зони термічного впливу, схильність до утворення холодних тріщин на ділянці перегрівання або в шві, де метал загартовується під час зварювання, та виникнення зон знеміцнення поза ділянками загартовування. Метою даної роботи є пошук можливості поліпшення якості та властивостей стикових з'єднань сталі 30ХГСА при забезпеченні підвищеної продуктивності зварювальних робіт, шляхом застосування лазерного зварювання. Якісні зварні з'єднання високоміцних сталей, принаймні товщиною 3,0 та 6,0 мм, можна виконувати при використанні лазерного випромінювання. Велика швидкість лазерного зварювання, яка у кілька або багато разів більша, ніж дугового зварювання, зумовлює отримання швів значно меншої ширини без надмірного провисання металу. При лазерному зварюванні у середовищі CO_2 , Ar, He, їх суміші та N_2 сталі 30ХГСА глибина проплавлення суттєво не змінюється. Під час лазерного зварювання у середовищі інертних газів досягається краще формування з'єднань, але при цьому можливе утворення пор. Застосування активуючого флюсу ВС-31 при лазерному зварюванні не ефективне. Встановлено, що при лазерному зварюванні мають місце високі швидкості нагрівання ($700 \dots 1200 \text{ }^\circ\text{C/s}$ і більше), короткочасне, на протязі кількох секунд, перебування при температурах інтенсивного росту зерна та великі швидкості охолодження $W6/5=10 \dots 80 \text{ }^\circ\text{C/s}$ в залежності від товщини сталі та режиму зварювання. Стикові з'єднання сталі 30ХГСА, виконані лазерним зварюванням, характеризуються підвищеною твердістю металу шва (менше в серединній частині) і прилеглих ділянок ЗТВ та наявністю знеміцнених ділянок ЗТВ, особливо термічно зміцненої сталі, на відстані 0,8...1,5 мм від шва. Відсутність холодних тріщин свідчить про невисоку схильність до тріщиноутворення таких з'єднань. Для зниження твердості, поліпшення пластичності металу та убезпечення від тріщиноутворення, зварні з'єднання доцільно піддавати додатковій термічній обробці. Отримані дані можуть бути використані при розробці технологій лазерного зварювання різних виробів, зокрема посудин тиску, із високоміцних сталей.

Ключові слова: сталь 30ХГСА; лазерне зварювання; стикові зварні з'єднання; захисний газ.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Посудини великого тиску для перевезення і використання стиснених газів, деталі зі зварних труб для автомобільних шасі та підвісок, інші різні види виробів відповідального призначення, виготовляють (або необхідно виготовляти) із високоміцних легованих сталей для підвищення службових характеристик та (або) зменшення металомісткості та ваги [1-3]. Зварювання їх виконують переважно дуговими способами, а належна працеспроможність зварних виробів досягається забезпеченням якісного формування зварних з'єднань, зміцнювальними обробками на етапах виробництва сталей і заготовок виробів, перед зварюванням окремих складових або після зварювання виробу в залежності від можливостей виробництва та вартості його здійснення [4-6]. Відповідно постає задача розробки та відпрацювання альтернативних технологій зварювання високоміцних легованих сталей.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Особливістю зварювання високоміцних сталей є чутливість їх до перегрівання з погіршенням властивостей металу зони термічного впливу (ЗТВ), схильність до утворення холодних тріщин на ділянці перегрівання або в шві, де метал загартовується під час зварювання, та виникнення зон знеміцнення в ЗТВ поза ділянками загартовування [7]. Тріщиноутворення уникають уповільненням охолодження при зварюванні, виконанням різного роду підігрівань, що ускладнює технологічний процес та погіршує умови роботи людей, терміновою післязварювальною термічною

обробкою або використанням високолегованих електродних матеріалів [8]. Останні характеризуються високою вартістю.

Високі рівні якості зварних з'єднань гартівних сталей при забезпеченні прийнятної вартості робіт досягаються дуговим зварюванням неплавким електродом у середовищі інертних газів з використанням активуючого флюсу [9]. Використанням активуючого флюсу збільшують глибину проплавлення при зменшенні її ширини, звужують ЗТВ, ділянки перегріву та відпуску, підвищують стійкість проти тріщиноутворення. Але істотне зниження продуктивності зварювання неплавким електродом при збільшенні товщини сталі зумовлює обмеження цього процесу сталями переважно відносно невеликої товщини.

МЕТА РОБОТИ

Метою даної роботи є пошук можливості поліпшення якості та властивостей стикових з'єднань сталі 30ХГСА товщиною 3,0 та 6,0 мм при забезпеченні підвищеної продуктивності зварювальних робіт, шляхом застосування лазерного зварювання.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Середньолегована конструкційна високоякісна середньовуглецева сталь 30ХГСА використовується для виробництва труб, поковок, листового та сортового прокату. Зварюється обмежено, а міцність і службові властивості 30ХГСА добре коригуються термообробкою. Сталь відноситься до хромокремнемарганцевистих сплавів, на що вказує буквене маркування. Остання буква «А» говорить про те, що це високоякісна середньолегована сталь. Наявність

феросиліцію, як ферітоутворювального елемента, збільшує кислотостійкість металу (Таблиця 1). Введення міді покращує корозійні властивості та параметри пластичності. А нікель зміцнює ферит, не знижуючи в'язкості.

Сталь 30ХГСА характеризується хорошою прожарюваністю й зносостійкістю. Демонструє досить непогану пластичність. Застосовуючи різні способи термообробки й використовуючи повітряну, масляну або рідинну середу, можна значно варіювати характеристики міцності сталі. Сталь 30ХГСА зварюється із застосуванням ручного, автоматичного електродугового та електрошлакового зварювання. Перед зварювальною обробкою вимагає ретельного прогріву, а по завершенню – термообробки. При цьому метал сплаву схильний до відпускнуї крихкості й утворення флокенів.

Сталь 30ХГСА застосовується у виробництві деталей з підвищеними вимогами до зносостійкості: поршневі механізми, що працюють у двигунах, штовхачі, зубчасті вали, важелі, осі, лопаті, фланці, сталеві колеса, відповідальні несучі конструкції, призначені для знакозмінних навантажень. Особливою категорією виробів із сталі 30ХГСА є безшовні труби. Безшовна труба виготовляється з круглого або порожнистого сталевого профілю способами гарячої та холодної деформації.

Лазерному зварюванню стикових з'єднань піддавалась листова середньолегована конструкційна високоякісна середньовуглецева хромо-марганцево-кремниста гартівна сталь 30ХГСА товщиною 3,0 та 6,0 мм у стані поставки та після термічного зміцнення. Зварювання на різних режимах здійснювали Nd:VAG-лазером «DY044» потужністю до 4,4 кВт з оптичним волокном діаметром 400 мкм та фокусом лінзи $F=300$ мм. Зварювання без і з розплавленням присаджуваного дроту Св-18ХМА діаметром 1,0 мм та обробку здійснювали у середовищі захисних газів Ar, He, CO₂, Ar+CO₂, N₂, при використанні порошку TiO₂, активуючого ВС-31 і дрібнорозмеленого плавного АН-15МУ флюсів та без захисту.

Режим лазерного зварювання і обробки змінювали і підтримували в межах $P=0,6...4,4$ кВт, положення фокусу ΔF – від -3 до +45 мм, швидкість зварювання $V_{зв}=8,4...150$ м/год (140...2500 мм/хв), швидкість подавання присаджуваного дроту $V_{ин}$ до 120 м/год (2000 мм/хв). За допомогою вольфрамрениєвої термопари ВР 20/5, розміщеної зі зворотної сторони стику, та самописного потенціометра КСП-4, визначалися термічні цикли зварювання і обробки. Попередній

підбір параметрів режиму здійснювався за критерієм якісного формування з'єднання з повним проплавленням стику. Дюраметричним методом досліджувалась механічна неоднорідність зварних з'єднань та змінення її в результаті обробок. Їх пластичність оцінювалась випробуванням на статичний згин.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Попередньо було визначено змінення параметрів лазерного проплавлення сталі 30ХГСА товщиною 3,0 та 6,0 мм, формування і твердість утворених швів в залежності від швидкості зварювання і захисного середовища.

При потужності лазерного випромінювання 3 кВт наскрізне проплавлення сталі 30ХГСА товщиною 3 мм досягається при швидкості зварювання 30 м/год. Ширина проплавлення при подаванні в зону зварювання Ar, CO₂ та їх суміші зменшується до 2,5...3,0 мм. А якщо потужність лазерного випромінювання підвищується до 4,4 кВт, то наскрізне проплавлення шириною 1,2 мм сталі товщиною 3 і 6 мм досягається при швидкості зварювання 90...150 і 36...60 м/год, відповідно. Для наскрізного проплавлення сталі товщиною 6 мм швидкість зварювання 72 м/год є занадто великою. Зі збільшенням $V_{зв}$ від 36 до 60 м/год ширина наскрізного проплавлення сталі товщиною 6 мм зменшується від 3,5 до 2,5 мм з лицевої сторони від 1,8 до 1,0 мм зі зворотної сторони. Проплавлення спроможність лазерного випромінювання в середовищі CO₂ є більшою, ніж у Ar. Незначне збільшення глибини проплавлення спостерігається при застосуванні активуючого флюсу ВС-31 під час зварювання у середовищі CO₂ і не виявляється у середовищі Ar, який сприяє поліпшенню формування поверхні шва. Наскрізне проплавлення металу характеризується наявністю незначного зворотного провисання та вузького потовщення посередині поверхні шва, у якому можуть утворюватися підрізи при $V_{зв}=48$ м/год.

Загальна глибина проплавлення при використанні CO₂, N₂ і He приблизно однакова, а при використанні Ar вона трохи зменшена. Наявність прокатної окалини сприяє збільшенню глибини проплавлення у середовищі Ar і зменшенню її у середовищі CO₂. Такий самий вплив виявляється при використанні активуючого флюсу ВС-31 на поверхні з окалиною. Слід відзначити також, що у швах середньовуглецевої легваної сталі, звареної у середовищі інертних газів, утворюються пори, які при застосуванні активних газів CO₂ і N₂ відсутні навіть при наявності прокатної окалини.

Таблиця 1. Хімічний склад сталі 30ХГСА

Масова частка елементів (максимальна), %								
C	Si	Mn	Cr	Cu	Ni	S	P	Fe
<0,34	<1,2	<1,1	<1,1	<0,3	<0,3	<0,0025	<0,055	основ.

Розфокусування лазерного випромінювання призводить до зниження щільності теплового потоку, інтенсивності випаровування та реактивного тиску парів металу, послаблення або уникнення утворення парогазового каналу у зварювальній ванні, зменшення її рухливості. Це сприяє поліпшенню формування з'єднання з плавними переходами від шва до основного металу, особливо при зменшенні швидкості зварювання та подаванні інертного газу в зону зварювання. Для зменшення глибини проплавлення доцільним може бути зниження потужності лазерного випромінювання. Якщо після глибокого проплавлення формується сильно занижений шов, то проходи зварювання з неповним проплавленням доцільно здійснювати з розплавленням присаджуваного дроту, чим забезпечується задана висота підсилення шва.

Слід зазначити, що при підвищеній швидкості 60...66 м/год зварювання з наскрізним проплавленням у середовищі Ar і CO_2 ($P=2,2...2,8$ кВт, $\Delta F=-5...+20$ мм) сталі товщиною 3,0 мм швидкість нагрівання досягає $1200^\circ\text{C}/\text{с}$ і більше, тривалість охолодження від 600 до 400°C становить $2,5...3,5$ секунди, тобто швидкість охолодження $W_{6/5}=60...80^\circ\text{C}/\text{с}$. З підвищенням швидкості зварювання до 150 м/год і, відповідно, швидкості охолодження спостерігається загальне підвищення твердості металу шва до $\text{HV}-0,2-(452...582)$. При цьому спостерігається тенденція до збільшення твердості шва при використанні для захисту суміші CO_2+Ar замість Ar і CO_2 . По висоті шва, звареного з $V_{\text{зв}}=60$ м/год з розплавленням присаджуваного дроту $\text{Св}-18\text{ХМА}$ спостерігається досить рівномірне розподілення твердості $\text{HV}-0,2-(430...470)$, трохи зниженої з ліцевої сторони. Метал ЗТВ, прилеглий до шва набуває твердість $\text{HV}-0,2-515$. Незначним зміцненням його до $\text{HV}-0,2-194$ на більш віддалених ділянках ЗТВ можна знехтувати. Не зважаючи на підвищену твердість металу, однопрохідне зварне з'єднання витримує випробування на статичний згин на кут 120° .

Твердість шва сталі 30ХГСА товщиною 6 мм, звареної зі швидкістю 60 і 54 м/год, становить $\text{HV}-0,2-(400...440$ і $390.480)$ з поступовим підвищенням до ліцевої сторони, біля якої виявлено зону з відмінною (поширеною) травимістю металу. В ЗТВ виявляються ділянки з твердістю, підвищеною до $\text{HV}-0,2-515$ та зниженою до $\text{HV}-0,2-208$ порівняно $\text{HV}-0,2-(220...230)$ основного металу.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Як видно, з'єднання сталі 30ХГСА товщиною 3,0 та 6,0 мм, виконані лазерним зварюванням за один прохід, набувають підвищену твердість в шві та прилеглих ділянках ЗТВ і незначне зменшення на ділянках ЗТВ з меншою температурою нагрівання при зварюванні. У протилежність цьому метал з'єднання

низьколегованої сталі товщиною 2 мм, виконаного лазерним зварюванням у середовищі CO_2 зі швидкістю 40 м/год, зменщується до $\text{HV}-(180...240)$ порівняно з $\text{HV}-240$ основного металу [10].

Встановлені нами значення підвищеної твердості металу зварних з'єднань відповідають структурі бейнітно-мартенситної суміші з різним співвідношенням складових [11]. З'єднання сталі 30ХГСА , виконані дуговим зварюванням, схильні до утворення холодних тріщин при вмісті в структурі металу 50% і більше мартенситу в умовах відсутності дифузійного водню, а при вмісті водню $0,15 \text{ см}^3/100\text{г}$ металу критичний вміст мартенситу знижується до 30% [12]. Відсутність тріщин в з'єднаннях цієї сталі після лазерного зварювання можна пояснити в певній мірі зменшенням ширини шва і ділянок ЗТВ із загартованим металом, рівня зварних напружень розтягу, розміру аустенітного зерна та утворенням дрібнодисперсної структури металу при збільшенні швидкості зварювання зі зниженням погонної енергії зварювання. А інтенсивне випаровування металу зі зварювальної ванни посилює газовиділення і послаблює пороутворення. В той же час, наявність в шві та зоні термічного впливу ділянок металу високої твердості та зниженої пластичності створює небезпеку крихкого руйнування зварних з'єднань в умовах експлуатації. Зниження твердості може бути досягнуто шляхом додаткової термічної обробки.

ВИСНОВКИ

1. Якісні зварні з'єднання високоміцних сталей, принаймні товщиною 3,0 та 6,0 мм, можна виконувати при використанні лазерного випромінювання. Велика швидкість лазерного зварювання, яка у кілька або багато разів більша, ніж дугового зварювання, зумовлює отримання швів значно меншої ширини без надмірного провисання металу.

2. При лазерному зварюванні у середовищі CO_2 , Ar , He , їх суміші та N_2 сталі 30ХГСА глибина проплавлення суттєво не змінюється. Під час лазерного зварювання у середовищі інертних газів досягається краще формування з'єднань, але при цьому можливе утворення пор. Застосування активуючого флюсу $\text{BC}-31$ при лазерному зварюванні не ефективно.

3. Встановлено, що при лазерному зварюванні мають місце високі швидкості нагрівання ($700...1200^\circ\text{C}/\text{с}$ і більше), короткочасне, на протязі кількох секунд, перебування при температурах інтенсивного росту зерна та великі швидкості охолодження $W_{6/5}=10...80^\circ\text{C}/\text{с}$ в залежності від товщини сталі та режиму зварювання.

4. Стикові з'єднання сталі 30ХГСА , виконані лазерним зварюванням, характеризуються підвищеною твердістю металу шва (менше в серединній частині) і прилеглих ділянок ЗТВ та наявністю

знеміцнених ділянок ЗТВ, особливо термічно зміцненої сталі, на відстані 0,8...1,5 мм від шва. Відсутність холодних тріщин свідчить про невисоку схильність до тріщиноутворення таких з'єднань.

5. Для зниження твердості, поліпшення пластичності металу та унеможливлення тріщиноутворення,

зварні з'єднання доцільно піддавати додатковій термічній обробці.

6. Отримані дані можуть бути використані при розробці технологій лазерного зварювання різних виробів, зокрема посудин тиску, із високоміцних сталей.

REFERENCES

- [1] Mikosyanchyk, O. O., Mnatsakanov, R. H., Lopata, L. A., Marchuk, V. E., & Yakobchuk, O. E. (2019). Wear resistance of 30KhGSA steel under the conditions of rolling with sliding. *Materials Science*, 55(3), 402-408. <https://doi.org/10.1007/s11003-019-00317-9>
- [2] Tsyban'ov, G. V., Marchuk, V. E., & Mikosyanchyk, O. O. (2019). Effect of textured dentated surfaces on 30KhGSA steel damage and life at fatigue, fretting fatigue, and fretting. *Strength of Materials*, 51(3), 341-349. <https://doi.org/10.1007/s11223-019-00080-x>
- [3] Shul'ginov, B. S. (2009). On the application of Gatts equation to the description of fatigue curve. *Strength of Materials*, 6(41), 699-707. <https://doi.org/10.1007/s11223-009-9176-6>
- [4] Homenko, M., & Dorozhkina, H. Upravlinnia innovatsiynym rozvytkom mashynobudivnoho pidpriemstva [Management of innovation development of a machine-building enterprise]. *Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho [Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University]*, (1(120)), 54-61. <https://doi.org/10.30929/1995-0519.2020.1.54-61> [in Ukrainian].
- [5] Degtyarev, V. A. (2020). Effect of residual stresses on the fatigue resistance of welded joints of steels of different strength levels. *Strength of Materials*, 52(2), 268-274. <https://doi.org/10.1007/s11223-020-00174-x>
- [6] Lobanov, L., Pashchin, N., & Mikhoduj, O. (2013). Electrodynamic straightening of elements of sheet welded structures. *The Paton Welding Journal*, (9), 18-23. <https://patonpublishinghouse.com/tpwj/pdf/2013/pdfarticles/09/4.pdf>
- [7] Usov, V. S., Rabkina, M. D., Shkatulyak, N. M., Nekhotyashchii, V. A., & Tkachuk, E. N. (2010). Structural relaxation of 30KhGSA steel in stamped-welded structures. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, 32(2), 247-254.
- [8] Paton, B. E., Savitsky, M. M., Savitsky, A. M., & Mazur, A. (2014). Effectiveness of natural gas transportation by sea at application of high pressure welded cylinders. *The Paton Welding Journal*, (8), 47-53. <https://doi.org/10.15407/tpwj2014.08.08>
- [9] Kulik, V. M., Savitsky, M. M., Elagin, V. P., & Demchenko, E. L. (2011). Capabilities of application of high-strength low-alloy pipe steels for manufacture of high-pressure vessels. *The Paton Welding Journal*, (2), 43-47. <https://patonpublishinghouse.com/tpwj/pdf/2011/pdfarticles/02/10.pdf>
- [10] Shelyagin, V. D., Khaskin, V. Yu., Siora, A. V., Bernatsky, A. V., Goncharenko, E. I., & Chizhskaya, T. G. (2007). Gas-shielded laser and laser-arc welding of steels. *The Paton Welding Journal*, (1), 27-30. Retrieved from <https://patonpublishinghouse.com/tpwj/pdf/2007/tpwj200701all.pdf>
- [11] Kulik, V. M., Vasiliev, V. G., Grigorenko, G. M., Savitsky, M. M., & Doroshenko, L. K. (2007). Phase and structural transformations in welding and arc treatment of 30KhGSA steel joints. *The Paton Welding Journal*, (9), 6-10. Retrieved from <https://patonpublishinghouse.com/tpwj/pdf/2007/tpwj200709all.pdf>
- [12] Lebedev, V. A., Lendel, I. V., Yarovitsyn, A. V., Los, E. I., & Dragan, S. V. (2016). Peculiarities of formation of structure of welded joints in arc surfacing with pulse feed of electrode wire. *The Paton Welding Journal*, (3), 18-23. <https://doi.org/10.15407/tpwj2016.03.03>

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Mikosyanchyk, O. O., Mnatsakanov, R. H., Lopata, L. A., Marchuk, V. E., & Yakobchuk, O. E. (2019). Wear resistance of 30KhGSA steel under the conditions of rolling with sliding. *Materials Science*, 55(3), 402-408. <https://doi.org/10.1007/s11003-019-00317-9>
- [2] Tsyban'ov, G. V., Marchuk, V. E., & Mikosyanchyk, O. O. (2019). Effect of textured dentated surfaces on 30KhGSA steel damage and life at fatigue, fretting fatigue, and fretting. *Strength of Materials*, 51(3), 341-349. <https://doi.org/10.1007/s11223-019-00080-x>
- [3] Shul'ginov, B. S. (2009). On the application of Gatts equation to the description of fatigue curve. *Strength of Materials*, 6(41), 699-707. <https://doi.org/10.1007/s11223-009-9176-6>
- [4] Хоменко М. М., Дорожкіна Г. М. (2020). Управління інноваційним розвитком машинобудівного підприємства. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*, (1(120)), 54-61. <https://doi.org/10.30929/1995-0519.2020.1.54-61>
- [5] Degtyarev, V. A. (2020). Effect of residual stresses on the fatigue resistance of welded joints of steels of different strength levels. *Strength of Materials*, 52(2), 268-274. <https://doi.org/10.1007/s11223-020-00174-x>
- [6] Lobanov, L., Pashchin, N., & Mikhoduj, O. (2013). Electrodynamic straightening of elements of sheet welded structures. *The Paton Welding Journal*, (9), 18-23. <https://patonpublishinghouse.com/tpwj/pdf/2013/pdfarticles/09/4.pdf>
- [7] Usov, V. S., Rabkina, M. D., Shkatulyak, N. M., Nekhotyashchii, V. A., & Tkachuk, E. N. (2010). Structural relaxation of 30KhGSA steel in stamped-welded structures. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, 32(2), 247-254.

- [8] Paton, B. E., Savitsky, M. M., Savitsky, A. M., & Mazur, A. (2014). Effectiveness of natural gas transportation by sea at application of high pressure welded cylinders. *The Paton Welding Journal*, (8), 47-53. <https://doi.org/10.15407/tpwj2014.08.08>
- [9] Kulik, V. M., Savitsky, M. M., Elagin, V. P., & Demchenko, E. L. (2011). Capabilities of application of high-strength low-alloy pipe steels for manufacture of high-pressure vessels. *The Paton Welding Journal*, (2), 43-47. <https://patonpublishinghouse.com/tpwj/pdf/2011/pdfarticles/02/10.pdf>
- [10] Shelyagin, V. D., Khaskin, V. Yu., Siora, A. V., Bernatsky, A. V., Goncharenko, E. I., & Chizhskaya, T. G. (2007). Gas-shielded laser and laser-arc welding of steels. *The Paton Welding Journal*, (1), 27-30. Retrieved from <https://patonpublishinghouse.com/tpwj/pdf/2007/tpwj200701all.pdf>
- [11] Kulik, V. M., Vasiliev, V. G., Grigorenko, G. M., Savitsky, M. M., & Doroshenko, L. K. (2007). Phase and structural transformations in welding and arc treatment of 30KhGSA steel joints. *The Paton Welding Journal*, (9), 6–10. Retrieved from <https://patonpublishinghouse.com/tpwj/pdf/2007/tpwj200709all.pdf>
- [12] Lebedev, V. A., Lendel, I. V., Yarovitsyn, A. V., Los, E. I., & Dragan, S. V. (2016). Peculiarities of formation of structure of welded joints in arc surfacing with pulse feed of electrode wire. *The Paton Welding Journal*, (3), 18-23. <https://doi.org/10.15407/tpwj2016.03.03>

© Бернацький А. В., Сіора О. В., Соколовський М. В., Шамсутдінова Н. О., Данилейко О. О.
 Дата надходження статті до редакції: 06.06.2023
 Дата затвердження статті до друку: 27.06.2023