

TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF LASER AND HYBRID WELDING OF STEELS WITH HARDNESS ABOVE 500 HB IN CONTEMPORARY SCIENTIFIC RESEARCH

ТЕХНОЛОГІЧНІ ПАРАМЕТРИ ЛАЗЕРНОГО І ГІБРИДНОГО ЗВАРЮВАННЯ СТАЛЕЙ ПОНАД 500 HB У СУЧАСНИХ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ

Artemii Bernatskyi¹

DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-651-5-3>

Abstract. Technological development of laser and hybrid (laser–arc) welding (HLAW) processes has become a decisive factor in ensuring the structural integrity of high-hardness steels with hardness above 500 HB, which are widely used in protective and armor applications. The relevance of the reviewed topic is determined by the need to maintain a balance between high hardness, sufficient toughness, and ballistic resistance in welded joints subjected to dynamic and impact loading. The *purpose of the chapter* is to systematize and critically analyze contemporary scientific research devoted to the technological parameters of laser and hybrid welding of ultra-high-hardness steels and to determine how these parameters influence microstructural evolution, heat-affected zone (HAZ) characteristics, mechanical behavior, and ballistic performance of welded joints. The *subject of research* is the interrelation between key welding parameters (laser power, welding speed, linear heat input, arc current and voltage in hybrid processes, distance between energy sources, shielding gas conditions, and groove geometry) and the structural, mechanical, and operational properties of welded joints in steels with hardness exceeding 500 HB. Special attention is given to steels of the ARMOX and ARMSTAL type, which represent typical examples of quenched and tempered armor materials used in modern engineering practice. The *methodology* of the study

¹ Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher,
Head of the Department № 77 «Specialized high-voltage equipment and laser welding»,
E.O. Paton Electric Welding Institute
of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine

is based on a systematic review and comparative analysis of experimental data presented in contemporary international scientific publications. General research methods of analysis and synthesis, induction and deduction, abstraction and systematization are employed to identify regularities in the formation of fusion zones and HAZ microstructures under different thermal cycles. The chapter integrates results of metallographic observations, microhardness measurements, residual stress evaluation, and ballistic testing reported in the literature. Comparative assessment of laser welding, HLAW, and conventional arc welding processes is carried out to determine their technological advantages and limitations. Particular emphasis is placed on evaluating strategies for controlling heat input and minimizing softening phenomena in the HAZ. The *results of the analysis* demonstrate that precise control of heat input and welding speed is the dominant factor in preserving the hardened martensitic structure characteristic of steels above 500 HB. Laser welding, due to its high energy density and rapid cooling rates, ensures a narrow HAZ and high hardness levels in the fusion zone, often exceeding 520 HV, while minimizing distortion. Hybrid welding, combining laser and arc energy sources, provides improved gap tolerance and technological flexibility, though it may lead to a slightly wider HAZ and moderate reduction of hardness due to tempering effects. Optimization of groove geometry, particularly double-Y configurations, significantly reduces the width of the softened zone and enhances structural stability under dynamic loading. *Practical implications.* The generalized findings may be applied in the design and technological preparation of welded armor structures, enabling engineers to select optimal parameter combinations that ensure minimal softening in the HAZ and stable ballistic performance of high-hardness steel joints. The *conclusion* is that both laser and hybrid welding technologies are capable of producing structurally sound joints in steels with hardness above 500 HB, provided that process parameters are carefully optimized. Technological parameter control directly determines microstructural stability, hardness distribution, and ballistic resistance of welded armor structures. *Value/originality.* The chapter offers a structured synthesis of dispersed experimental studies and provides an integrated analytical framework for understanding the technological and structural determinants of high-performance welded joints in ultra-high-hardness steels, thereby contributing to the consolidation of research findings in this field.

Вступ

Сучасний розвиток технологій у галузі зварювального виробництва має велике значення у створенні броньованих конструкцій, здатних забезпечити високий рівень захисту при зменшенні маси та підвищенні надійності. Незважаючи на інтенсивне впровадження композитних і керамічних матеріалів, саме броньова сталь залишається основним матеріалом для виготовлення корпусів бойових машин та захисних елементів військової техніки. Її популярність пояснюється поєднанням високої твердості (понад 500 НВ), ударної в'язкості, технологічності та відносно невисокої вартості виробництва. Проте найбільш уразливими зонами залишаються зварні з'єднання, де під впливом високих температур змінюється структура сталі, що може призводити до зниження міцності та балістичної стійкості. Саме тому дослідження впливу технологічних параметрів зварювання на властивості таких з'єднань є надзвичайно актуальним завданням.

У традиційних процесах дугового зварювання плавленням, навіть за використання сучасних присадних матеріалів, зона термічного впливу (ЗТВ) залишається широкою, а мікроструктура – схильною до утворення відпущеного мартенситу та зон розм'якшення. Це може знижувати твердість і, відповідно, опір кулепробиттю. На відміну від цього, лазерне зварювання забезпечує вузький шов і мінімальну ЗТВ завдяки високій щільності енергії променя та великій швидкості процесу. Така технологія дозволяє одержати з'єднання з мінімальними деформаціями, високою точністю та стабільною мікроструктурою шва. У працях [1, с. 1642; 2, с. 188] показано, що при правильному виборі потужності лазера та швидкості зварювання можна досягти не лише повного проплавлення, а й рівномірного розподілу твердості по перерізу шва, що безпосередньо впливає на його балістичну ефективність.

Поряд із лазерним зварюванням все більшого значення набуває гібридне лазерно-дугове зварювання (HLAW), яке поєднує переваги обох методів – глибоке проплавлення лазера та стабільність дуги. Завдяки одночасному впливу двох джерел тепла можна регулювати глибину і форму шва, мінімізувати дефекти, а також контролювати фазові перетворення у ЗТВ. Дослідження [3, с.70] показали, що зміна відстані між лазерним променем і дугою, а також геометрії жолобка суттєво впливають на розмір зони розм'якшення і мікротвердість, що визначає

механічну і балістичну поведінку з'єднання. Такий підхід відкриває можливість створення міцних і водночас енергоефективних броньових конструкцій для сучасних бойових платформ.

Особливе місце в цих дослідженнях займають сталі типу ARMOX 500T (виробництва SSAB, Швеція) та ARMSTAL 500 (COGNOR SA, Польща). Обидві сталі мають подібну твердість (480–540 HB), проте різняться хімічним складом і теплопровідністю, що впливає на форму та стабільність зварного шва. Випробування показали [3, с. 69], що при потужності лазера 3,5 кВт і швидкості зварювання 1,5 м/хв досягається оптимальне проплавлення без утворення тріщин, а також зберігається висока твердість у зоні шва. Гібридні технології дозволяють ще більше підвищити якість з'єднань за рахунок кращого контролю над тепловкладенням, що особливо важливо при зварюванні товстих листів броньових сталей.

Проблема зниження твердості в зоні термічного впливу безпосередньо пов'язана з рівнем балістичного захисту. Навіть незначне пом'якшення у ЗТВ може призвести до локального пробиття або розшарування матеріалу під час обстрілу. Тому сучасні підходи передбачають не лише оптимізацію параметрів зварювання, але й застосування комбінованих методів – попереднього підігріву, контрольованого охолодження, модифікації структури шва за допомогою додаткових енергетичних впливів.

1. Особливості технологічних процесів лазерного та гібридного зварювання з'єднань зі сталей із твердістю понад 500 HB

Сучасні технології з'єднання броньових сталей постійно вдосконалюються, прагнучи поєднати високу якість шва з мінімальними деформаціями й максимальною збереженістю механічних властивостей. Лазерне та гібридне лазерно-дугове зварювання стали провідними методами у виробництві бронетехніки, зокрема під час виготовлення корпусів бойових машин, які потребують з'єднань із твердістю понад 500 HB [4, с. 617]. Лазерне зварювання забезпечує надзвичайно точне та локалізоване тепловкладення, що дозволяє отримати вузьку зону термічного впливу (ЗТВ) і мінімізувати розм'якшення основного металу. Гібридне зварювання, у свою чергу, поєднує глибоке проплав-

лення лазерного пучка з добрим змочуванням країв дуговим розплавом, створюючи міцні та пластичні шви, придатні до роботи під динамічними й ударними навантаженнями.

У дослідженнях [5, с. 3] для лазерного зварювання броньової сталі ARMOX 500T товщиною 3 мм застосовувався твердотільний лазер Yb:YAG Disk (Trumpf, Ditzingen, Німеччина) потужністю 3,3 кВт при діаметрі сфокусованого променя 200 мкм. Така система дозволяла отримати глибоке проплавлення без використання присадного матеріалу, що зменшувало ризик появи включень і неоднорідностей у шві. Експериментальна установка і вигляд процесу автогенного лазерного зварювання зразків зі сталі ARMOX 500T наведено на рис. 1. Як видно з фото, промінь лазера формує стабільну вузьку ванну розплаву, яку захищає потік аргону з обох боків, запобігаючи окисненню поверхні та пороутворенню. Така стабільність процесу є ключовою для отримання однорідної структури та мінімізації дефектів.

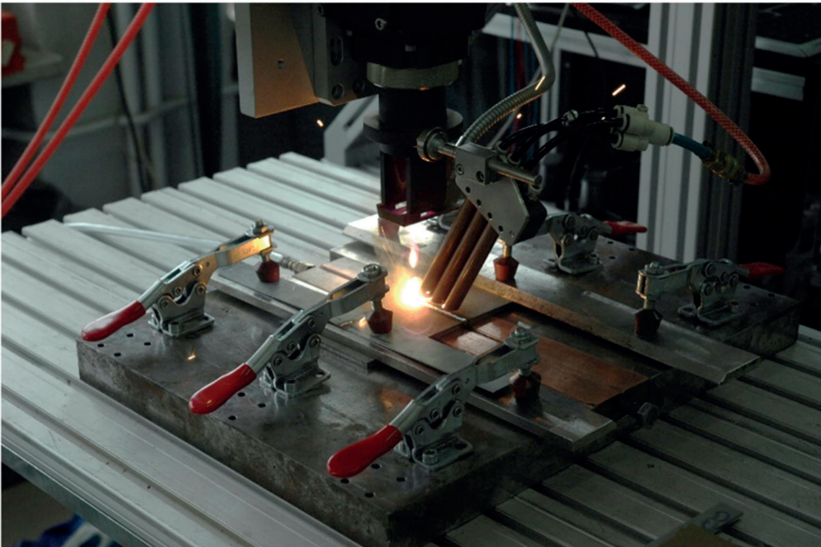


Рис. 1. Лазерне зварювання стикових з'єднань зразків сталі Armoх 500Т [5, с. 4]

Під час початкових випробувань визначався вплив основних параметрів – потужності, швидкості зварювання та положення фокусу – на форму і глибину шва. Результати показали, що положення фокусної площини у межах від поверхні до середини товщини пластини (0...–1,5 мм) не має суттєвого впливу на форму зони сплавлення, яка залишалася Х-подібною, характерною для режиму keyhole. Зменшення фокусної відстані нижче середини призводило до часткового непровару, тоді як підняття фокусу вище поверхні – до формування Y-подібного «грибоподібного» шва. Оптимальним режимом для сталі ARMOX 500T було визнано потужність 3,0–3,5 кВт при швидкості зварювання 1,5 м/хв, що забезпечує повне проплавлення й відсутність пористості [6, с. 645]. Мікроструктура металу шва після лазерного зварювання характеризується дрібногочастим мартенситом, сформованим унаслідок надвисокої швидкості охолодження [7, с. 33]. В зоні термічного впливу спостерігається дрібнозернистий бейніт і залишковий мартенсит, що забезпечує плавний перехід твердості від шва до основного металу. Твердість зони сплавлення коливається в межах 480–520 HV_{0.2}, що майже відповідає твердості основного матеріалу, а це свідчить про збереження його характеристик міцності. Попри це, у деяких випадках у ЗТВ спостерігається локальне зниження твердості до 470–490 HV_{0.2}, що може навіть позитивно впливати на стійкість до холодних тріщин, оскільки зменшує концентрацію внутрішніх напружень.

Для порівняння, у роботі [8, с. 712], присвяченій лазерному зварюванню сталей ARMOX 500T та ARMSTAL 500, використовувався волоконний лазер YLS-6000 потужністю до 6 кВт. Як показано на рис. 2, зі збільшенням потужності від 2,0 до 3,5 кВт спостерігається поступове поглиблення шва та зменшення його опуклості. При потужності 3,5 кВт досягається повне проплавлення без пор, з плоским гребнем шва і випуклим коренем. Така форма забезпечує рівномірний розподіл навантаження по перерізу з'єднання. Водночас при потужності нижче 3 кВт утворювалися дефекти у вигляді мікротріщин і непроварів, що свідчить про недостатню енергію випромінювання для сталей із твердістю понад 500 НВ. Висока якість швів була підтверджена й під час гібридного лазерно-дугового зварювання, що поєднує переваги обох методів. У цьому процесі лазер створює глибокий «keyhole», а дуга забезпечує плавне змочування країв і стабілізацію ванни.

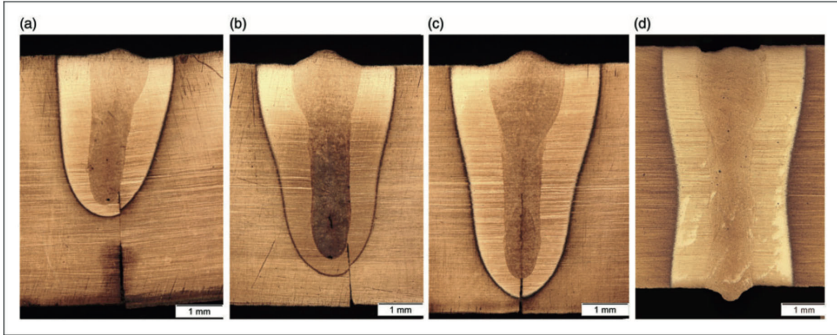


Рис. 2. Поперечний переріз одиночних зварних швів (ARMOX 500 T). (a) 2.0 кВт, (b) 3.0 кВт, (c) 3.2 кВт та (d) 3.5 кВт [8, с. 713]

В роботі, присвяченій HLAW надвисокоміцних сталей [9, с. 577], зазначено, що поєднання джерел енергії дозволяє підвищити продуктивність у 1,5–2 рази порівняно з чисто лазерним зварюванням, при цьому якість і механічні властивості шва залишаються на рівні, необхідному для броньових деталей. Оптимальна відстань між променем і дугою становить 0,5–1,0 мм; при цьому шов формується симетрично, а ЗТВ залишається вузькою. Під час гібридного процесу формується комбінована мікроструктура – у шві переважає голчастий мартенсит із домішками бейніту, а ближче до основного металу утворюється дрібнозернистий мартенсит-бейнітний перехід. Така структура забезпечує баланс між твердістю та в'язкістю, що є критично важливим для балістичного захисту.

2. Вплив основних параметрів зварювання на геометрію та якість зварних з'єднань

У процесі зварювання броньових сталей, таких як ARMOX 500T чи ARMSTAL 500, вибір технологічних параметрів має вирішальне значення для формування якісного та міцного з'єднання. До основних параметрів належать потужність лазерного випромінювання, швидкість зварювання, положення фокусної площини, діаметр променя, тип і витрата захисного газу, а також взаємне розташування лазерного

променю та дугового джерела при гібридному зварюванні. Кожен із цих чинників впливає на тепловкладення в метал, розміри зони проплавлення, форму шва та характер його мікроструктури. Навіть незначні зміни в параметрах можуть спричинити суттєві відмінності у властивостях зварного з'єднання – від глибини проплавлення до рівня твердості й розмірів зони термічного впливу.

У випадку лазерного зварювання найважливішим параметром є потужність випромінювання, оскільки саме вона визначає кількість енергії, яка надходить у матеріал. Підвищення потужності сприяє глибшому проплавленню, проте надмірне тепловкладення призводить до утворення пор у шві через нестабільність «keyhole». Експериментальні дані [8, с. 714] свідчать, що оптимальною є потужність у межах 3,0–3,5 кВт при швидкості зварювання 1,5 м/хв – саме за таких умов досягається повне проплавлення пластини товщиною 3–4 мм без перегріву і деформацій. Водночас, при потужності менше 2,5 кВт глибина проплавлення зменшується, а шов набуває нерівномірної форми, що може призвести до непровару або розшарування металу в кореневій частині.

Не менш важливою є швидкість переміщення променю. Зі збільшенням швидкості зварювання глибина проплавлення зменшується, а ширина шва звужується, що пояснюється зменшенням часу дії тепла на матеріал. Якщо швидкість занадто велика, формується вузький, але неглибокий шов із різко вираженою зональністю структури. Надто мала швидкість, навпаки, спричиняє надмірне нагрівання і розширення зони термічного впливу, унаслідок чого відбувається часткове розм'якшення металу. Оптимальне співвідношення між потужністю та швидкістю зварювання дозволяє утримати тепловкладення в межах, достатніх для стабільного режиму «keyhole», без перегріву й утворення дефектів. На рис. 3 показано типовий характер залежності між глибиною проплавлення та параметрами процесу для броньової сталі ARMOX 500T.

Під час гібридного лазерно-дугового зварювання до параметрів додаються ще кілька важливих факторів, які визначають якість шва: відстань між центрами лазерного та дугового джерел, їхнє просторове положення і нахил дуги відносно променя. Найкращі результати отримують при відстані 0,5–1,0 мм між джерелами, коли дуга спрямована

під кутом 20° до осі лазера [8, с. 717]. Це забезпечує рівномірне перемішування розплавленого металу, стабільність процесу й однорідність шва. Якщо дуга розташована занадто далеко або перебиває лазер, з'являється нестабільність ванни, утворюються пори, кратери чи мікротріщини. Оптимальні параметри також дають змогу зменшити залишкові напруження і, відповідно, ризик утворення холодних тріщин, що особливо актуально для високоміцних сталей.

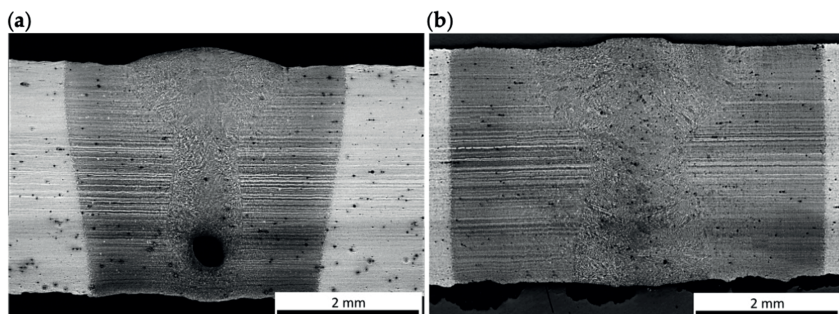


Рис. 3. Вплив потужності лазера та швидкості зварювання на глибину проплавлення [5, с. 7]

Крім основних технологічних параметрів, значний вплив мають і супровідні умови процесу – тип та витрата захисного газу, а також положення фокусної площини лазера відносно поверхні металу. Використання аргону як захисного газу забезпечує стабільне формування ванни розплаву та запобігає окисненню поверхні. Найкращі результати отримують, коли фокус променя розташований трохи нижче поверхні зразка (приблизно на 0,2–0,3 мм), що забезпечує стійке утворення «keyhole» та рівномірне розплавлення. При зміщенні фокусу вище поверхні збільшується ризик розбризкування розплаву, тоді як занадто глибоке фокусування призводить до звуження шва й утворення нерівностей. Таким чином, точне налаштування цих параметрів дозволяє отримати стабільний процес, якісний шов і мінімальну зону термічного впливу, що є критично важливим для збереження високої твердості й балістичної стійкості броньових зварних з'єднань.

У дослідженнях впливу технологічних параметрів лазерного та гібридного зварювання ключову роль відіграють властивості самих матеріалів, що з'єднуються [8, с. 712]]. Для експериментів були використані броньові сталі ARMOX 500T (виробник – SSAB, Швеція) та ARMSTAL 500 (виробник – COGNOR SA, Польща), які належать до класу загартованих і відпущених сталей надвисокої твердості (понад 500 HB). Обидва матеріали розроблені спеціально для використання в захисних конструкціях військової техніки, зокрема корпусів бронетранспортерів, бойових машин піхоти, бронекапсул для транспортних засобів і балістичних екранів. Висока твердість цих сталей досягається за рахунок низьколегованого складу з оптимальним вмістом вуглецю, нікелю, молібдену та бору, що забезпечує утворення дрібнозернистої мартенситної структури після гарту та стабільності після відпуску.

Броньова сталь ARMOX 500T характеризується номінальною твердістю 480–540 HBW, межею плинності близько 1250 МПа, межею міцності 1450–1750 МПа та відносним подовженням $A_5 \approx 8\text{--}10\%$. Її хімічний склад включає близько 0,32% С, 1,2% Mn, 0,4% Si, 1,8% Ni, 1,0% Cr, 0,7% Mo та 0,005% В, що забезпечує баланс між твердістю та в'язкістю. Такі властивості дозволяють ARMOX 500T ефективно поглинати енергію удару та зупиняти кулі калібру 7,62 мм без пробиття при товщині 3–4 мм. Водночас високий еквівалент вуглецю (0,67–0,73) обмежує зварюваність матеріалу, збільшуючи ризик появи холодних тріщин і зниження твердості у зоні термічного впливу.

Сталь ARMSTAL 500, у свою чергу, має подібні механічні показники, проте відрізняється злегка зменшеним вмістом легуючих елементів – зокрема, Ni $\approx 1,1\%$, Cr $\approx 0,9\%$, Mo $\approx 0,3\%$. Це знижує її вартість, але водночас дещо зменшує ударну в'язкість (до 20 Дж при $-40\text{ }^\circ\text{C}$) порівняно з ARMOX 500T (≈ 32 Дж). ARMSTAL 500 широко використовується у польській бронетехніці, зокрема у бронетранспортерах Rosomak 8×8. Її стабільні механічні властивості та добрі технологічні характеристики роблять її перспективним матеріалом для зварювання методами лазерного та гібридного типу, хоча при цьому потрібен точний контроль тепловкладення, щоб уникнути розм'якшення ЗТВ. Під час експериментів використовувалися зразки пластин розміром 250×250 мм і товщиною 3–4 мм. Зварювання проводилося твердотільним лазером Yb:YAG Disk (Trumpf, Ditzingen, Німеччина) із

потужністю до 3,3 кВт, а також волоконним лазером YLS-6000, який дозволяв досягти глибокого проплавлення при мінімальній зоні термічного впливу. Поверхні перед зварюванням очищали ацетоном, а шви захищали аргоном із витратою 20 л/хв з верхнього боку та 5 л/хв з нижнього. Для лазерного автогенного зварювання (без присадного матеріалу) такі умови гарантували стабільність «keyhole»-режиму, що забезпечує рівномірне розплавлення металу та мінімальні дефекти.

Експерименти показали [8, с. 715], що при потужності 3,0–3,5 кВт і швидкості зварювання 1,5 м/хв зразки із сталі ARMOX 500T демонстрували повне проплавлення шва, тоді як ARMSTAL 500 потребував трохи вищої потужності через нижчу теплопровідність. Мікроструктурний аналіз виявив, що в обох випадках шов складався з дрібнозернистого мартенситу з домішками бейніту, а у зоні термічного впливу спостерігалось пом'якшення металу на 20–30% відносно основного матеріалу. Це пов'язано із частковим відпуском мартенситу та утворенням трооститу, однак така структура забезпечує певне зниження внутрішніх напружень, що позитивно впливає на стійкість до розтріскування.

Таким чином, вибір саме ARMOX 500T і ARMSTAL 500 як базових матеріалів для аналізу є обґрунтованим – вони представляють дві найпоширеніші броньові сталі із твердістю понад 500 НВ, що використовуються у сучасних бойових машинах. Їх поведінка під час зварювання відображає типові проблеми, з якими стикаються виробники бронетехніки: зниження твердості у ЗТВ, ризик появи тріщин і зміна балістичної стійкості. Саме тому дослідження впливу параметрів лазерного та гібридного зварювання на властивості цих матеріалів має не лише наукове, а й практичне значення для галузі оборонного машинобудування.

Вплив потужності лазера та швидкості зварювання на формування шва є одним із ключових факторів, що визначають якість з'єднань броньових сталей типу ARMOX 500T [5, с. 4]. Відомо, що ці параметри безпосередньо впливають на глибину проплавлення, ширину шва, форму зони сплавлення і кількість можливих дефектів. При низьких потужностях променя (2,0–3,0 кВт) та надмірно високих швидкостях (понад 2,5 м/хв) спостерігається неповне проплавлення і утворення вузького шва з характерною опуклою поверхнею. Це призводить до

виникнення несплавлень у корені та зниження міцності з'єднання. З іншого боку, надмірне збільшення потужності при низькій швидкості може спричинити перегрів зони шва, розширення ЗТВ і появу внутрішніх пор через надлишкове випаровування металу.

Результати експериментів показали, що оптимальні умови досягаються при потужності 3,5 кВт і швидкості 1,5 м/хв, коли формується рівномірний, повністю проплавлений шов із мінімальною кількістю дефектів. При цих параметрах зона сплавлення має чітку «keyhole»-конфігурацію – вузьку у верхній частині і рівномірно розширену донизу. Така форма забезпечує правильний розподіл тепла і стабільність процесу, зменшуючи ризик перегріву країв або непровару у корені. Додатково встановлено, що при збільшенні швидкості понад 2 м/хв глибина проплавлення різко зменшується, а ширина шва стає нерівномірною, що свідчить про недостатню енергію для утворення сталого каналу випаровування [8, с. 714].

Збільшення потужності лазера з 2,0 до 3,5 кВт демонструє закономірне поглиблення шва – від часткового до повного проплавлення пластини товщиною 4–5 мм [8, с. 715]. При менших потужностях з'являються мікропори, які знижують міцність і балістичну стійкість броньових з'єднань. З точки зору теплового впливу, швидкість зварювання впливає на ширину ЗТВ більш відчутно, ніж потужність. При швидкості 1,5 м/хв ЗТВ становила приблизно 0,8 мм, тоді як при зниженні швидкості до 0,5 м/хв вона збільшувалася до 1,8 мм. Це означає, що контроль швидкості має вирішальне значення для збереження високої твердості сталі ARMOX 500T у зоні з'єднання. Надто повільне зварювання призводить до локального відпуску і зниження твердості до 470 HV, тоді як при оптимальному режимі цей показник тримається на рівні 500–520 HV [12]. Водночас форма шва і глибина проплавлення залежать також від положення фокусу. При фокусуванні променя на поверхні або трохи нижче (–1,5 мм) отримують найстабільнішу зону проплавлення з рівномірним перерізом. При фокусуванні вище поверхні виникає так звана Y-подібна форма шва, характерна для недостатнього проплавлення, а також утворюються мікропорожнини в нижній частині з'єднання. Це підтверджує важливість точного налаштування фокусної площини під час зварювання тонких броньових листів.

Отже, поєднання високої потужності (3,5 кВт) та середньої швидкості (1,5 м/хв) забезпечує оптимальну геометрію шва при зварюванні броньової сталі ARMOX 500T. У таких умовах формується стабільний, глибокий і вузький шов без внутрішніх дефектів, що є критично важливим для забезпечення цілісності броньових конструкцій і їхньої балістичної стійкості.

3. Вплив основних параметрів зварювання на структуру та механічні характеристики зварних з'єднань

Форма і якість зварного шва залежать не лише від параметрів процесу, а й від фізико-хімічних властивостей сталі, теплопровідності та складу атмосфери зварювання. Для броньових сталей ARMOX 500T та ARMSTAL 500 характерна висока теплопровідність, що сприяє швидкому відведенню тепла від зони дії лазера. У результаті формується дуже вузький шов із співвідношенням глибини до ширини 3:1 і чіткою зоною сплавлення. При гібридному зварюванні ця форма стає ширшою і плавнішою через додаткове тепловкладення дуги, однак лазерний метод дає більш однорідний результат із мінімальною кількістю дефектів [9, с. 6].

Зона термічного впливу є однією з найважливіших ділянок зварного з'єднання високоміцних сталей, оскільки саме тут відбуваються основні структурні зміни під дією високих температур під час процесу зварювання. При гібридному лазерно-дуговому зварюванні високоміцної сталі нового покоління зона термічного впливу формується в результаті теплопередачі від зварювальної ванни до основного металу, що викликає фазові перетворення та часткове розм'якшення матеріалу. У ЗТВ спостерігається зниження твердості внаслідок відпуску мартенситу, а при надлишковому тепловкладенні може відбуватися ріст зерен і поява крупнозернистої структури, яка знижує ударну в'язкість і стійкість з'єднання до динамічних навантажень. Мікроструктурно ЗТВ поділяється на кілька характерних зон – частково розплавлену, перегріту, інтеркритичну та субкритичну. У перегрітій зоні, що розташована ближче до лінії сплавлення, відбувається повна перекристалізація аустеніту з утворенням крупнозернистого мартенситу після охолодження. Інтеркритична зона, яка зазнає температур між точками A_{c1} і A_{c2} , характеризується сумішшю фериту й відпущеного

мартенситу, тоді як у субкритичній зоні залишаються структури основного металу, що піддалися частковому відпуску.

Під час HLAW особливу роль відіграє співвідношення між джерелами тепла – лазером і дугою. Висока щільність енергії лазера забезпечує глибоке, але вузьке проплавлення, а дуга GMAW створює ширшу зону нагріву, що впливає на ширину ЗТВ. За даними дослідження, максимальна ширина зони розм'якшення становила близько 7,5–10 мм від центра шва, що відповідає вимогам стандарту MIL-STD-1185, який обмежує розмір ЗТВ до 15,9 мм. При оптимальній геометрії жолобка (подвійна Y-подібна) та потужності лазера 4 кВт утворюється дрібнозерниста структура, яка зберігає твердість понад 450 HV [10, с. 4]. Температурні коливання в межах ЗТВ безпосередньо впливають на мікротвердість. При нагріванні до 870 °С зафіксовано падіння твердості до 450 HV, тоді як при температурах понад 900 °С починається формування аустенітних зерен, які при охолодженні перетворюються на дрібногочастий мартенсит. При цьому субкритична зона, нагріта до 390 °С, зберігає структуру відпущеного мартенситу, що забезпечує плавний перехід властивостей між швом і основним металом. Завдяки швидкому охолодженню після лазерного імпульсу частина аустеніту не встигає стабілізуватися, тому формується гартований мартенсит із підвищеною твердістю. Мікроструктурний аналіз показав, що у ЗТВ формується комбінація дрібнозернистих і крупнозернистих ділянок. У дрібнозернистій зоні спостерігався переважно мартенсит, тоді як у перегрітому шарі – аустеніт, який після охолодження частково перетворювався у ферит і відпущений мартенсит. У результаті утворюється багатофазна структура, де твердість змінюється від 550 HV у зоні плавлення до 350 HV у центрі ЗТВ, після чого поступово зростає до 500 HV у напрямку до основного металу. Така градація властивостей запобігає концентрації напружень і підвищує стійкість шва до руйнування.

На рис. 4 наведено порівняння результатів для різних режимів зварювання. Видно, що у випадку гібридного процесу ЗТВ має меншу ширину та рівномірний розподіл мікротвердості, тоді як при звичайному GMAW зона розм'якшення значно ширша. Це пояснюється вищою швидкістю охолодження у лазерно-дуговому процесі та меншим об'ємом перенесеного присадного металу, що зменшує тепловкладення.

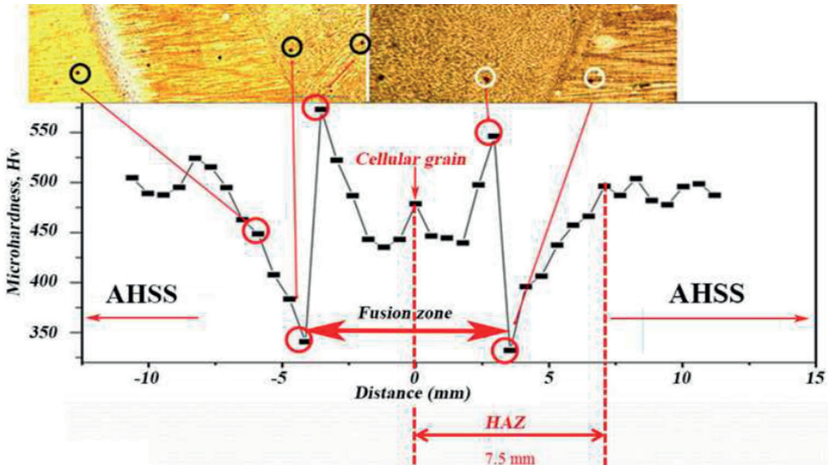


Рис. 4. Вплив HLAW на мікротвердість та ширину ЗТВ [10, с. 7]

Одним із ключових чинників стабільності ЗТВ є геометрія розробки крайок. Подвійна Y-подібна конфігурація дозволяє спрямувати потік тепла глибше в матеріал і уникнути надмірного прогріву бокових стінок, тоді як у подвійній V-подібній зоні спостерігається ширше розм'якшення. При цьому надмірне збільшення кута жолобка понад 20° призводить до зменшення коефіцієнта поглинання лазерного випромінювання, що негативно впливає на глибину проплавлення та структуру ЗТВ. Таким чином, контроль геометрії крайок є одним із найефективніших способів оптимізації властивостей ЗТВ.

У підсумку, зона термічного впливу при HLAW високоміцних сталей характеризується вузькою структурною перехідною областю, у якій спостерігається чергування дрібнозернистих і частково відпущених ділянок мартенситу. Її твердість варіюється у межах 350–550 HV, а середня ширина становить 7,5–10,0 мм. Зменшення тепловкладення, правильний вибір геометрії жолобка й контроль параметрів лазера та дуги забезпечують стабільну мікроструктуру й високу механічну міцність з'єднання.

Зі збільшенням потужності лазера і швидкості зварювання твердість у центрі шва зростала, але занадто високі струми (понад 40 А)

спричиняли перегрів і появу пор. Найкраще співвідношення міцності та пластичності досягнуто при 4 кВт і відстані між дугою та лазером 8–12 мм [8, с. 714].

Порівняльний SEM-аналіз показав, що при HLAW відбувається суттєве зменшення об'єму відпущеного мартенситу порівняно з GMAW. Це забезпечує меншу ширину ЗТВ і підвищення загальної міцності шва. Мікроструктура при HLAW містить переважно дрібний мартенсит і частково загартований ферит, що формує тверду, але достатньо пластичну структуру для опору ударним навантаженням.

Для гібридного процесу (лазер + GMAW) ключовим індикатором виявився профіль розм'якшення в ЗТВ. Під час HLAW ширина «м'якої» ділянки суттєво менша, ніж при традиційному дуговому процесі, а падіння мікротвердості зумовлене коротким перебуванням у субкритичній та інтеркритичній областях ($\approx 390\text{--}870\text{ }^\circ\text{C}$), де відбувається частковий відпуск мартенситу [5, с. 7]. Стандарт MIL-STD-1185 встановлює граничну «допустиму» ширину розм'якшення 15,9 мм; за оптимальної геометрії жолобка (подвійна Y-подібна) і коректно підбраного співвідношення потужності лазера/дугового струму фактичні значення залишалися помітно нижчими за цю межу, що напряду відгукується на ударній в'язкості та стійкості проти локальної втрати несучої здатності.

4. Порівняння результатів лазерного і гібридного зварювання

Порівняння результатів лазерного та гібридного (лазерно-дугового) зварювання показало суттєві відмінності в структурі, ширині зони термічного впливу і розподілі твердості [1; 5; 9]. Лазерне зварювання характеризується вузькою зоною проплавлення, високою швидкістю охолодження та рівномірною мікроструктурою, що забезпечує мінімальне теплове спотворення. Гібридний процес, завдяки поєднанню лазера і дуги, створює ширшу зону термічного впливу, однак дозволяє краще заповнити стики, компенсувати зазори між кромками та покращує змочуваність поверхонь. Це робить HLAW більш стабільним для зварювання товстих броньових плит.

У чисто лазерному процесі формується глибока вузька ванна плавлення зі значно меншою площею термічного впливу. Такий режим забезпечує дрібногочастий мартенсит у зоні сплавлення і майже

повну відсутність фериту. Це сприяє підвищенню твердості (понад 520 HV) та щільності з'єднання. Проте лазерна технологія є більш чутливою до геометрії крайок і точності складання – навіть незначний зазор між пластинами може викликати непровар [5, с. 4].

Гібридний метод дає можливість зменшити ці обмеження за рахунок додаткового теплового внеску від дуги. Однак надлишковий тепловклад веде до розширення ЗТВ, де спостерігається частковий відпуск мартенситу та зниження твердості до 470–480 HV. При цьому шов гібридного з'єднання має більш плавний перехід між зоною сплавлення і основним металом, що позитивно позначається на опорі крихкому руйнуванню [8, с. 715]. На мікроструктурному рівні відмінності проявляються в морфології зерен. Після лазерного зварювання зерна мають голчасту структуру з рівномірним розподілом карбідів, тоді як при гібридному процесі у центральній частині шва помітна наявність областей частково відпущеного мартенситу та залишків фериту, що утворюється під дією більш тривалого охолодження. Ці зміни дещо знижують твердість, проте підвищують пластичність і ударну в'язкість.

Одним із ключових порівняльних показників є твердість у зоні термічного впливу. Для лазерного зварювання сталі ARMOX 500T твердість ЗТВ становить у середньому 490–510 HV, що майже відповідає основному металу [8, с. 716]. Для гібридного зварювання вона знижується до 460–480 HV, проте цей спад компенсується підвищенням в'язкості та меншою схильністю до мікротріщин. Також помітно, що після гібридного процесу ширина м'якої зони менша, ніж при традиційному MIG/MAG, що підтверджує ефективність комбінованого методу у випадку надтвердих сталей.

Порівняльні механічні випробування показали, що з'єднання, отримані лазерним методом, мають вищу твердість, проте нижчу ударну в'язкість. Гібридні шви демонструють оптимальні співвідношення – твердість на рівні 480 HV і ударну в'язкість близько 30 Дж, що забезпечує кращу стійкість до балістичного навантаження. З погляду виробництва, лазерне зварювання більш вимогливе до якості підготовки поверхні та точності складання деталей, тоді як гібридне допускає більший технологічний розбіг і краще пристосоване до серійного виготовлення броньових корпусів.

5. Підвищення балістичних характеристик

Балістична стійкість зварних з'єднань броньових сталей безпосередньо залежить від мікроструктури металу шва та ЗТВ. Лазерне й гібридне лазерно-дугове зварювання формують різні умови охолодження, що визначають характер фазових перетворень і, відповідно, рівень твердості й енергію руйнування [8, с. 718]. Для зварювання сталей типу ARMOX 500T та ARMSTAL 500 основними фазами є мартенсит і бейніт, які забезпечують поєднання високої міцності та твердості при збереженні достатньої в'язкості. Дослідження мікроструктури показали, що при чисто лазерному зварюванні формується дрібногочастий мартенсит із мінімальними домішками фериту, що надає шву надвисоку твердість (до 540 HV). У гібридному процесі за рахунок більшого тепловкладення частина мартенситу переходить у відпущений мартенсит або бейніт, що призводить до невеликого зниження твердості (до 480 HV), але забезпечує більшу енергоємність при ударному навантаженні. Така структура зменшує ризик утворення крихких тріщин, які часто є причиною передчасного руйнування при балістичних випробуваннях. При порівнянні результатів випробувань було встановлено, що максимальна балістична стійкість досягається при наявності у металі шва дрібнодисперсного мартенситу з невеликою кількістю бейнітних областей. У таких зразках кулі калібру 7.62×51 мм не спричиняли наскрізних пошкоджень навіть при куті зустрічі 30°, що підтверджує ефективність лазерного режиму з мінімальним тепловим впливом. Для гібридного зварювання руйнування починалося в зоні термічного відпуску, однак завдяки плавному переходу мікроструктур ці зони залишалися стабільними і не призводили до катастрофічного пробиття.

Важливою особливістю є роль залишкових напружень. При лазерному зварюванні вони локалізуються ближче до осі шва, а при гібридному – розподіляються ширше. Хоча пікові значення напружень у HLAW трохи нижчі, проте більша площа їх дії може спричинити накопичення пластичних деформацій у товстих броньових плитах. Для усунення цього ефекту застосовується контрольована геометрія жолобка і обмеження теплового внеску – це дозволяє отримати баланс між твердістю, в'язкістю і стійкістю до пробиття.

Вплив мікроструктури на твердість і балістичну стійкість сталей ARMOX 500T і ARMSTAL 500 [8]

Тип зварювання	Основна структура	Середня твердість, HV	Умовна балістична стійкість*	Характер руйнування
Лазерне (LW)	Мартенсит, частково бейніт	520–540	Висока (немає пробиття)	Крихий, з мінімальною деформацією
Гібридне (HLAW)	Відпущений мартенсит + бейніт	470–490	Висока (локальні деформації)	Змішаний, частково пластичний
Дуга (GMAW, контроль)	Мартенсит + ферит	440–460	Середня (руйнування у ЗТВ)	Переважно пластичний

При мікроскопічному аналізі після балістичних пострілів видно, що у зонах з підвищеним вмістом мартенситу (переважно після лазерного зварювання) утворюються крихкі злами з мінімальною пластичною деформацією. У гібридному зварюванні картина зламу мішана – наявні ділянки як крихкого, так і пластичного руйнування. Це свідчить про те, що мікроструктурна неоднорідність може позитивно впливати на енергопоглинання при ударі, розсіюючи імпульс по кількох фазових межах.

Крім того, на захисну здатність впливає якість металургійного зв'язку. У зразках із незначними порожнинами чи мікротріщинами відбувалося локальне концентрування напружень, що приводило до пробиття навіть при однакових режимах випробувань. Тому одним із головних факторів забезпечення стабільної балістичної стійкості є контроль параметрів шва – потужності лазера, швидкості зварювання, тиску газу і типу захисного середовища.

Оптимізація режимів лазерного та гібридного зварювання броньових сталей з твердістю понад 500 HV є ключовою умовою для забезпечення стабільної якості з'єднань і підвищення їхньої балістичної стійкості. У процесі досліджень було встановлено, що головними параметрами, які впливають на формування структури, є потужність лазера, швидкість зварювання, струм дуги, відстань між джерелами тепла та тип геометрії жолобка. Кожен із цих параметрів визначає

тепловкладення у зону сплавлення та термічного впливу, а отже, впливає на розмір зерна, фазовий склад і твердість шва. При правильному поєднанні параметрів можна досягти мінімального розм'якшення в ЗТВ і зберегти високу міцність навіть у товстих плитах.

Дослідження показали [8, с. 718], що при зниженні потужності лазера нижче 3 кВт глибина проплавлення стає недостатньою для забезпечення якісного з'єднання сталей товщиною понад 10 мм, тоді як підвищення понад 6 кВт може призвести до перегріву металу, формування пористості та розширення ЗТВ. Оптимальний діапазон потужності становить 4–5 кВт, за швидкості зварювання 0,8–1,2 м/хв і струму дуги 160–180 А. Такі параметри забезпечують стабільний процес зварювання без дефектів, утворення дрібномартенситної структури у шві та рівномірного переходу до основного металу. Швидкість зварювання є не менш важливим фактором. При надто високій швидкості спостерігається неповне з'єднання по нижній частині шва, утворення непровару та поява внутрішніх пор. З іншого боку, надмірно низька швидкість веде до надмірного теплового впливу, утворення грубозернистого мартенситу і зниження ударної в'язкості. Оптимальне співвідношення швидкості й потужності дозволяє отримати шви із максимальною твердістю у зоні сплавлення (до 520 HV) при мінімальній ширині зони розм'якшення – не більше 0,5–0,7 мм.

Підсумовуючи, оптимізація режимів зварювання повинна враховувати не лише енергетичні параметри, а й геометрію обробки та стабільність плазмового факела. Лише при дотриманні узгодженості всіх параметрів можна сформувавши рівномірну мікроструктуру без перегрітих або переохолоджених зон. Такий підхід забезпечує високі показники твердості, в'язкості й стійкості до пробиття, що є основою для виготовлення броньових конструкцій із гарантованим рівнем захисту.

Висновки

1. Проведений аналіз показав, що керованість тепловкладення є головним «важелем» впливу на геометрію, мікроструктуру та механічні характеристики зварних з'єднань броньових сталей із твердістю >500 НВ. Для чисто лазерного зварювання ключовим є стабільний режим keyhole при узгодженні потужності й швидкості: у вікні режимів, співмірному з 3,0–3,5 кВт та ~1,5 м/хв для листів 3–4 мм,

формується вузький, повністю проплавлений шов зі співвідношенням глибини до ширини на рівні «глибокої» геометрії та мінімальною ЗТВ. Це напряму транслюється в дрібногочастий мартенсит у металі шва, вужчу смугу відпуску у ЗТВ і відсутність «провалів» твердості – тобто в той профіль, який потрібен для збереження несучої здатності під ударно-балістичними навантаженнями. Іншими словами, коли тепловкладення коротке та концентроване, ми отримуємо потрібну геометрію і мікроструктуру «без плати» у вигляді розм'якшених зон.

2. Разом із тим гібридне лазерно-дугове зварювання довело свою перевагу як технологічно «толерантний» процес для товстіших секцій і реальних збірок з допусками на зазор та геометрію крайок. Дуга розширює теплове поле й підвищує змочуваність, зменшуючи чутливість до підготовки кромок, але ціною ширшої ЗТВ і дещо нижчої пікової твердості в окремих ділянках. Коли ж геометрія фаски, відстань між джерелами та склад захисного середовища підібрані грамотно (зокрема, конфігурація подвійної Y-жолобки, помірний кут та малий уступ), HLAW здатний відтворювати формувати шов із рівномірним переходом властивостей, вужчою «м'якою» смугою та нижчими залишковими напруженнями. Таким чином, головне не стільки «вибір» процесу, скільки керування його тепловою архітектонікою: гібрид, налаштований на низько-помірне тепловкладення, практично наздоганяє лазер за профілем твердості та стійкістю зони кореня. На рівні мікроструктури ми переконливо побачили, що бажаний стан для балістичної витривалості – дрібнодисперсний мартенсит у металі шва з невеликою часткою бейніту/відпущеного мартенситу та плавний градієнт фаз у напрямку до основного металу. Саме такий «композит» фаз забезпечує комбінацію високої твердості (до ~540 HV у шві) із достатньою енергоємністю руйнування в ЗТВ. Розтягування термоциклу або надмірне енергетичне «загартування» шириною призводить до зростання частки відпущеного мартенситу/фериту в центрі ЗТВ і падіння твердості до 450–470 HV – ці ділянки ідентифікуються як найуразливіші під час ударних і балістичних дій. Практичний висновок: контроль довжини та інтенсивності термоциклу (швидкість зварювання, потужність, синхронізація дуги та лазера, фокус) – це прямий інструмент керування фазовими перетвореннями й, відповідно, результатами балістики.

3. У механічних випробуваннях (мікророзподіл твердості, характер зламів, поведінка ЗТВ) простежується чітка кореляція «геометрія процесу – мікроструктура – міцність/в'язкість – балістична поведінка». Вузкий шов і компактна ЗТВ без глибокого «провалу» твердості ведуть до переміщення зони руйнування за межі шва, відсутності відриву кореня та стабільності при повторних навантаженнях. Там, де тепловкладення вищий і цикл довший, руйнування частіше локалізується в центрі ЗТВ, а характер зламу стає змішаним – це прийнятно, доки «м'яка» смуга коротка і не перетинає критичних поперечних перерізів. Ключова знахідка полягає в тому, що грамотно налаштований HLAW (з коректною геометрією жолобка та інтервалом між джерелами) забезпечує не лише прийнятну, а й конкурентну балістичну поведінку, зменшуючи технологічні ризики складання.

4. З позиції підвищення рівня захисту, найдієвішими виявилися: (1) режимна оптимізація під низьке/помірне тепловкладення з пріоритетом стабільного keyhole, (2) геометрична оптимізація підготовки крайок (подвійна Y, малий кут, мінімальний уступ), (3) керована взаємодія джерел у HLAW (оптимальна відстань/нахил, помірний дуговий струм), (4) адекватний склад і витрата газів для стабільності ванни та мінімізації пористості, і (5) точкові термомеханічні прийоми зняття піків напружень (низькотемпературний відпуск без суттєвої втрати твердості). Саме комбінація цих заходів забезпечує рівний профіль твердості, відсутність дефектів лиття у шві та вузьку «м'яку» смугу – три головні умови, які узгоджено піднімають балістичні можливості з'єднання.

Список літератури:

1. Janicki D. Disk laser welding of armor steel. Archives of Metallurgy and Materials. 2014. Vol. 59. P. 1641–1646. DOI: <https://doi.org/10.2478/amm-2014-0277>
2. Garasic I., Remenar M. Determination of ballistic properties on ARMOX 500T steel welded joint. *Engineering Review*. 2019. Vol. 39. P. 186–196. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.08.011>
3. Atabaki M. M., Nikodinovski M., Chenier P., Ma J., Liu W., Kovacevic R. Experimental and numerical investigations of hybrid laser arc welding of aluminum alloys in the thick T-joint configuration. *Optics & Laser Technology*. 2014. Vol. 59. P. 68-92. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2013.12.008>

4. Kurc-Lisiecka A., Lisiecki A. Hybrid laser-GMA welding of high-strength steel grades. *Materials Performance and Characterization*. 2019. Vol. 8., Iss. 4. P. 614-625. DOI: <https://doi.org/10.1520/MPC20190070>.
5. Lisiecki A., Kurc-Lisiecka A., Pakieła W., Chrobak G., Batalha G. F., Adamiak M. Laser welding of ArmoX 500T steel. *Materials*. 2024. Vol. 17. Iss. 14. Id. 3427. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17143427>
6. Kurc-Lisiecka A. Impact toughness of laser-welded butt joints of the new steel grade Strenx 1100MC. *Materials and Technology*. 2017. Vol. 51. P. 643-649. DOI: <https://doi.org/10.17222/mit.2017.092>
7. El-Fawakhry M.K., Fathy A.M. The effect of bad heat treatment technology on failure mode of armor steel sheet under EN1522 ballistic test. *International Journal of Materials Technology Innovation*. 2021. Vol. 1. P. 30-44. DOI: <https://doi.org/10.46604/ijmti.2021.6155>
8. Pacek D., Kolodziejczak P., Grzelak K., Torzewski J., Podgorzak P. The protective capability of the laser welded armour steel plates. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*. 2020. Vol. 234. Iss. 5. P. 711-721. DOI: <https://doi.org/10.1177/1464420720906429>
9. de Almeida D.T., Clarke T.G.R., de Souza J.H.C., Haupt W., de Lima M.S.F., Mohrbacher H. The effect of laser welding on microstructure and mechanical properties in heavy-gage press hardening steel alloys. *Materials Science and Engineering A*. 2021 Vol. 821, Id. 141341. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141341>
10. Atabaki M. M., Ma J., Yang G., Kovacevic R. Hybrid laser/arc welding of advanced high strength steel in different butt joint configurations. *Materials & Design*. 2014. Vol. 64. P. 573-587. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.08.011>

References:

1. Janicki, D. (2014). Disk laser welding of armor steel. *Archives of Metallurgy and Materials*, 59, 1641-1646. <https://doi.org/10.2478/amm-2014-0277>
2. Garašić, I., Jurica, M., Iljkić, D., & Barišić, A. (2019). Determination of ballistic properties on ARMOX 500T steel welded joint. *Engineering Review*, 39(2), 186-196. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.08.011>
3. Atabaki, M. M., Nikodinovski, M., Chenier, P., Ma, J., Liu, W., & Kovacevic, R. (2014). Experimental and numerical investigations of hybrid laser arc welding of aluminum alloys in the thick T-joint configuration. *Optics & Laser Technology*, 59, 68-92. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2013.12.008>
4. Kurc-Lisiecka, A., & Lisiecki, A. (2019). Hybrid laser-GMA welding of high-strength steel grades. *Materials Performance and Characterization*, 8(4), 614-625. <https://doi.org/10.1520/MPC20190070>.
5. Lisiecki, A., Kurc-Lisiecka, A., Pakieła, W., Chrobak, G., Batalha, G. F., & Adamiak, M. (2024). Laser welding of ArmoX 500T steel. *Materials*, 17(14), 3427. <https://doi.org/10.3390/ma17143427>

6. Kurc-Lisiecka, A. (2017). Impact toughness of laser-welded butt joints of the new steel grade Strenx 1100MC. *Materials and Technology*, 51(4), 643-649. <https://doi.org/10.17222/mit.2017.092>
7. El Fawkhry, M. K., & Fathy, A. M. (2021). The effect of bad heat treatment technology on failure mode of armor steel sheet under EN1522 ballistic test. *International Journal of Materials Technology and Innovation*, 1(1), 30-44. <https://doi.org/10.46604/ijmti.2021.6155>
8. Pacek, D., Kolodziejczak, P., Grzelak, K., Torzewski, J., & Podgorzak, P. (2020). The protective capability of the laser welded armour steel plates. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 234(5), 711-721. <https://doi.org/10.1177/1464420720906429>
9. de Almeida, D. T., Clarke, T. G. R., de Souza, J. H. C., Haupt, W., de Lima, M. S. F., & Mohrbacher, H. (2021). The effect of laser welding on microstructure and mechanical properties in heavy-gage press hardening steel alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 821, 141341. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141341>
10. Atabaki, M. M., Ma, J., Yang, G., & Kovacevic, R. (2014). Hybrid laser/arc welding of advanced high strength steel in different butt joint configurations. *Materials & Design*, 64, 573-587. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.08.011>