

ОСОБЛИВОСТІ ЛАЗЕРНОГО ЗВАРЮВАННЯ ДЕРЕВИНО РІЗАЛЬНИХ СТРІЧКОВИХ ПИЛОК

Лазерне зварювання – найефективніший метод з'єднання кінців стрічкових пилок за наявності високих вимог до з'єднання, за допомогою якого можна отримати естетичний, рівний і гладкий шов без деформувань та викривлень. Лазерне зварювання має низку переваг, але водночас основною вадою лазерного зварювання є висока вартість обладнання та потреба висококваліфікованого обслуговування. Розглянуто головні особливості методу з'єднання стрічкової пилки в безкінечну стрічку лазерним зварюванням. Найголовнішою із таких особливостей є те, що воно має найвищий ступінь концентрації енергії на окремій невеликій ділянці. Сутність процесу лазерного зварювання полягає в тому, що як джерело теплової енергії для виконання робіт застосовують з генерований штучним способом лазерний промінь. Високі швидкості охолодження шва (до 3000° С/с) і зварювання (до 120 м/год) низько вуглецевих сталей впливають на його первинну і вторинну структуру. Ці ж чинники забезпечують отримання розорієнтованої дрібнозернистої структури, що сприяє підвищенню тривкості шва до появи гарячих тріщин. Проведено класифікацію способів лазерного зварювання металів за трьома групами та переваги і вади лазерного зварювання. Відпалювання після зварення, що містить нагрівання до температури 450–470°С і витримування упродовж 30 с (рекомендований фірмою Rentgen – виробником сталі CR400), зумовлює поступове вирівнювання розподілу твердості. У сталі CR400, що містить хром і вольфрам на нижній допустимій межі (3,5 % і 5,3 %, відповідно), повного відновлення твердості після відпалу не спостерігається. Коливання твердості досягає 30–35%, що негативно позначається на міцності пилки. Для усунення цієї вади треба вирівняти твердості, що можна забезпечити спеціальним термозміцнюванням. Запропоновано розробити режими лазерного термозміцнювання зварного шва після процесу зварювання, що зумовлюватиме істотне підвищення тривкості інструмента.

Ключові слова: стрічкова пилка, лазерне зварювання, структури металу, режим зварювання.

Вступ. Пиляння стрічковою пилкою – простий, дешевий і економічно вигідний спосіб розпилювання, який забезпечує цілком задовільні результати під час розпилювання деревини. В основі вироблення пилок лежить з'єднання заздалегідь підготовленої стрічки в кільце. На сьогодні найпоширеніші методи з'єднання стрічкової пилки в безкінечну стрічку – паяння та зварювання. Серед поширених джерел енергії, що їх застосовують для зварювання, лазерне випромінювання має найвищий ступінь концентрації енергії на окремій невеликій ділянці. За концентрацією енергії таке випромінювання перевершує інші джерела теплоти в десятки разів. Такі високі показники зумовлені унікальними характеристиками лазерного променя, насамперед, його монохроматичністю і когерентністю.

Лазерне зварювання – це метод зварювання металу, який призначений для особливо точного з'єднання виробів. Часто його застосовують за наявності високих вимог до з'єднання, що якраз стосується з'єднання кінців стрічкових пилок. За допомогою лазерного зварювання можна отримати естетичний, рівний і гладкий шов без деформування, викривлення. Цей тип зварювання також характери-

¹ Ребезнюк Ігор Тарасович, д-р техн. наук, професор, директор Інституту інженерної механіки, автоматизації та комп'ютерноінтегрованих технологій. Email: rebeznyuk@nltu.edu.ua ; <https://orcid.org/0000-0001-5924-7700>

² Лазарчук Катерина Ярославівна, аспірант, кафедра деревообробного обладнання та інструментів. Email: k.lazarchuk@nltu.edu.ua ; <https://orcid.org/0000-0003-3082-6017>

зують високою продуктивністю. Обладнання для виконання лазерного зварювання недешево, але воно швидко окуповується, і з кожним днем його потреба зростає як на виробництві, так і в умовах невеликих ремонтних майстерень.

Виклад основного матеріалу дослідження. Сутність процесу лазерного зварювання полягає в тому [1], що як джерело теплової енергії для виконання робіт застосовують згенерований штучним способом лазерний промінь. Лазерне зварювання (рис.1) засноване на спрямуванні через систему фокусування світлового випромінювання 1, яке збирається в пучок невеликого перетину фокусуювальним дзеркалом 2, відбивальним дзеркалом 3, проходить у корпусі 4 і через газову суміш 5 спрямовується на стик виробу – стрічкової пилки 6.

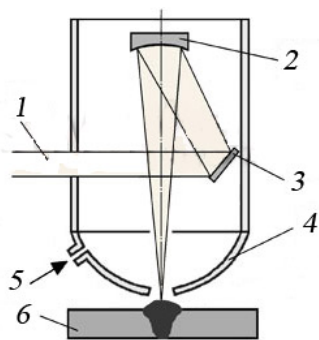


Рис. 1. Схема лазерного зварювання: 1 – промінь лазера; 2 – фокусуювальне дзеркало; 3 – відбивальне дзеркало; 4 – корпус; 5 – захисний газ; 6 – виріб – стрічкова пилка

Частково відбиваючись, а частково потрапляючи в товщу матеріалу, промінь підходить до робочої поверхні. При цьому поверхня заготовки моментально поглинає пучок променів лазера і в цей самий час відбувається плавлення матеріалу, яке і забезпечує формування зварювального шва. Такий тип зварювання здійснюють імпульсним або безперервним варіантом випромінювання. Якщо робота ведеться з заготовками невеликої товщини – від декількох мікрон до декількох міліметрів – то зварювальний процес виконують із застосуванням розфокусування лазерного пучка. Робиться це для того, щоб не пропалити наскрізь робочу поверхню деталі. У результаті отримуємо з'єднувальний шов, що його показано на рис. 2.

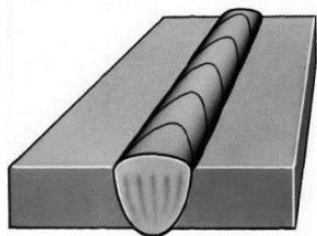


Рис. 2. З'єднувальний шов, який виконаний лазерним зварюванням

Лазерне зварювання забезпечує високу концентрацію енергії без застосування спеціальних вакуумних камер, його можна проводити як на повітрі, так і в одному із середовищ вуглекислого газу, аргону, гелію та інших. За лазерного зварювання на поверхнях відбувається локальне нагрівання з малими розмірами термічного впливу і малим об'ємом розплавленого металу, а порівняно великі швидкості зварювання до 20–40 мм/с забезпечують високу продуктивність процесу.

Високі швидкості зварювання та охолодження шва (до 3000° С/с) низькоуглецевих сталей впливають на його первинну і вторинну структуру. Жорсткий термічний цикл зварювання забезпечує мінімальний час перебування ділянки зварювання у стані перегріву, що зменшує ймовірність аустенітного перетворювання, унеможливорює зростання зерен і погіршення механічних властивостей шва. Ці ж чинники забезпечують отримання розорієнтованої дрібнозернистої структури (рис. 3), що сприяє підвищенню тривкості шва до появи гарячих тріщин [2].

Високі швидкості охолодження шва, малий обсяг зварювальної ділянки і активне перемішування рідкого металу ускладнюють насичування металу шва газами (особливо воднем), що зменшує пористість шва і підвищує його тривкість щодо появи холодних тріщин. Способи лазерного зварювання металів класифікують за трьома групами. Класифікація за енергетичною ознакою – щільністю

потужності лазера E , Вт/см² відповідно до площі сфокусованого променя з урахуванням тривалості термічного впливу. Лазерне зварювання виконують, як правило, за $E = 10^5\text{--}10^7$ Вт/см². Меншу щільність потужності не рекомендують, оскільки в цьому випадку ефективнішим і економічнішим будуть інші способи зварювання, наприклад, дугова. Можливі три основні режими з різним поєднанням потужності та тривалості термічного впливу:

1. $E = 10^5\text{--}10^6$ Вт/см², $t > 10\text{--}2$ с. Цей режим забезпечують лазерами безперервної дії. Такий режим використовують для зварювання конструкційних сталей різної товщини.
2. $E = 10^6\text{--}10^7$ Вт/см², $t < 10\text{--}3$ с. Цей режим забезпечують лазери імпульсно дії. Поєднання зазначеної потужності і тривалості випромінювання дає змогу зварювати матеріали різної товщини і з меншими витратами енергії, ніж за використання лазерів безперервної дії.
3. $E = 10^5\text{--}10^6$ Вт/см², $t = 10\text{--}3 < t < 10\text{--}2$ с. Цей режим, як і попередній, забезпечують лазерами імпульсно-періодичної дії і застосовують під час зварювання металу малої товщини.

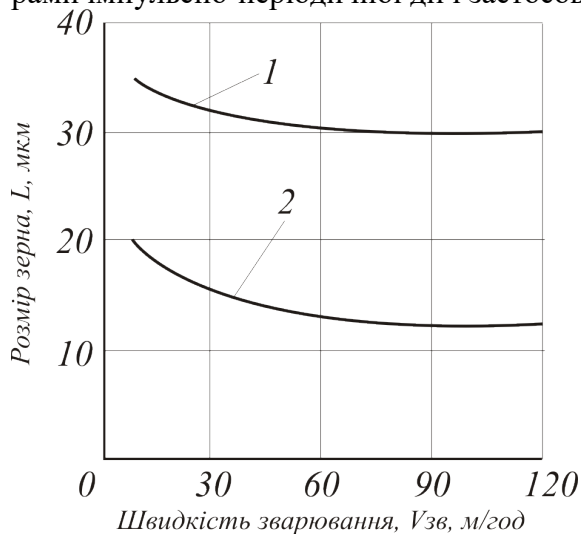


Рис. 3. Залежність розміру аустенітного зерна від методу і швидкості зварювання: 1 – дугове зварювання; 2 – безперервне лазерне

Класифікація за технологічними ознаками. За цими ознаками зварювання лазером поділяють на зварювання з глибоким проплавленням і зварювання малої товщини. Зварювання з глибоким проплавленням, здебільшого, виконують без присадкового матеріалу, але, в окремих випадках, для поліпшення зварюваності сталей і поліпшення проплавлення, присадковий метал подають в зону зварювання. Також зварювання з глибоким проплавленням здійснюють в середовищі захисних газів, і виконувати його можна як лазерами безперервної дії, так і імпульсно-періодичними лазерами.

Зварювання малої товщини також може проводитися лазерами безперервної дії та імпульсно-періодичними. При цьому, лазерами безперервної дії виконують шовне зварювання, а лазерами імпульсно-періодичними як шовне, так і точкове. Переважно зварювання малої товщини відбувається без присадкового матеріалу.

Метали малої товщини можна зварювати без захисного середовища, на ефективність проплавлення малої товщини захисні гази практично не впливають. Класифікація за економічними ознаками. Перша ознака – швидкість зварювання. Цей показник безпосередньо визначає продуктивність зварювання, сприяє зниженню гарячих тріщин і холодних тріщин при зварюванні різних конструкційних матеріалів. Важливим економічним показником зварювання лазером є значна економія матеріалу внаслідок малих обсягів розплавленого металу. Висока концентрація енергії лазерного променя забезпечує локальність зварювання і це є третім економічним показником. Умова локальності дає змогу отримати зварене з'єднання в край обмеженою за розмірами зоні. Переваги лазерного зварювання зробили цю технологію популярною і затребуваною. Але вона також як і інші зварювальні роботи має негативні сторони, які обов'язково потрібно попередньо розглянути.

Серед основних позитивних ознак лазерного зварювання такі:

1. Висока точність і стабільність траєкторії плями нагрівання.

2. Невеликий розмір зварного з'єднання.
3. Відсутнє нагрівання біля шовної ділянки. Унаслідок цього спостерігається мінімальна деформація деталей, що зварюються.
4. Висока хімічна чистота зварювального процесу. Це пов'язано з тим, що під час зварювання не використовуються присадки, флюси, електроди.
5. Швидке переналагоджування під час зварювання нових розмірів пилок.
6. Зварені шви мають високу якість і міцність.

Негативні ознаки лазерного зварювання:

1. Устаткування лазерного зварювання має високу вартість.
2. Лазерно-дугове зварювання має низький показник ККД.
3. Залежність зварювального процесу від відбивної здатності заготовки;
4. Високі вимоги до кваліфікації обслуговувального персоналу;
5. Особливі вимоги до приміщень, у яких розміщують лазерне устаткування.

Це стосується показників вібрації, вологості і запиленості.

Проведений аналіз результатів вимірювання твердості матеріалу пилки CR400 на ділянці зварювання [3] показує наявність ділянок з різною твердістю (рис. 4, а, де x_1 -осьова координата, яка відраховується від стику). Падіння твердості в самому контакті пояснюють знеуглецюванням поверхонь заготовок, зростанням зерна та виділенням карбідів. Відпалювання після зварення, що містить нагрівання до температури 450–470°C і витримування упродовж 30 с (рекомендоване фірмою Rentgen – виробником сталі CR400), зумовлює поступове вирівнювання розподілу твердості. У сталі CR400, що містить хром і вольфрам на нижній допустимій межі (3,5 % і 5,3 %, відповідно), повного відновлення твердості після відпалу не спостерігається (рис. 4, б).

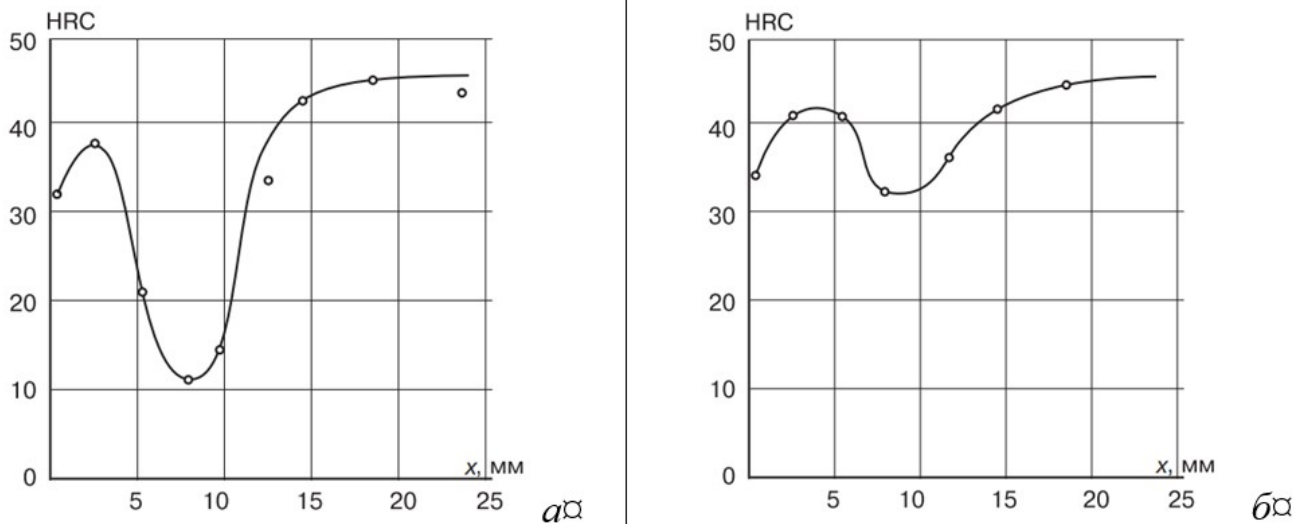


Рис. 4. Розподіл твердості у зварному з'єднанні стрічкових пилок зі сталі CR400 безпосередньо після стикового лазерного зварювання (а) і після відпалювання (б)

Коливання твердості досягає 30–35%, що негативно впливає на міцність пилки. Для усунення цієї вади треба провести вирівнювання твердості, що можна забезпечити спеціальним термозміцнюванням. На сьогодні виявляється значний інтерес до застосування лазерного термозміцнювання для підвищення експлуатаційних характеристик стрічкових пилок з вуглецевих сталей [3]. Лазерне термозміцнення відрізняється високою локальністю оброблення, точним дозуванням кі-

лькості введеної енергії, високими швидкостями нагрівання й охолодження і відносно простою автоматизацією процесу.

Висновок. Лазерне зварювання – найефективніший метод з'єднання кінців стрічкових пилок за наявності високих вимог до з'єднання і за його допомогою можна отримати гладкий шов без деформування та викривлення. Аналіз розподілу твердості поверхні пилки на ділянці отриманого зварного шва показав потребу вирівнювання твердості, застосувавши лазерного термозміцнювання зварного шва після процесу зварювання. Щоб забезпечити істотне підвищення тривкості інструмента щодо спрацьовування на ділянці отриманого зварного шва треба розробити режими лазерного термозміцнювання зварного шва після процесу зварювання, а саме, такі параметри: щільність енергії, тривалість імпульсу лазерного випромінювання, діаметр сфокусованої плями, коефіцієнт перекриття і частоту проходження імпульсів лазерного випромінювання.

Література

1. **Grigor'yants A.G., Shiganov I.N., Misurov A.I.** (2006) : *Tekhnologicheskiye protsessy lazernoy obrabotki* [Technological processes of laser processing]. – Moskva: MGTU, 664 p. (in Russian).
2. **Grigor'yants A.G.** (1989) : *Osnovy lazernoy obrabotki materialov* [Fundamentals of laser material processing]. – Moskva: Mashinostroyeniye, 304 p. (in Russian).
3. **Klyushkin M.K.** (2007) : *Povysheniye ekspluatatsionnykh svoystv svarnykh zagotovok poloten lentochnykh pil iz instrumental'nykh uglerodistykh staley* [Improving the operational properties of welded workpieces of band saw blades made of tool carbon steels] // *Tekhnologiya mashinostroyeniye. Sbornik statey.* – Moskva: MGTU. – P. 133-147. (in Russian).

UDC 621.787

**Prof. I.T. Rebeznyuk, Doktor of Sciences,
post-graduate student K. Lazarchuk – UNFU**

Features of laser welding of wood-cutting band saws

Abstract. Laser welding is the most effective method of joining the ends of band saws according to the high level of existing jointing requirements; using this method allows you to form anesthetic, even and smooth sound weld without deformation. Laser welding has a number of advantages but at the same time the main disadvantage of laser welding is the high cost of equipment and the need for highly qualified maintenance. The paper considers the main features of the method for joining a number of band saws into an endless band saw by laser welding. The specific feature of laser welding is that it produces the highest degree of energy density on a tiny spot. The essence of the laser welding process is that an artificially generated laser beam is used as a source of thermal energy to perform the work. High cooling rates of the weld (up to 3,000° C/s) and high speeds of welding (up to 120 m/h) of low-carbon steels affect the primary and secondary structure. The same factors provide a disordered fine-grained structure, which contributes to an increased resistance of the weld to the appearance of hot cracks. The laser welding of metals operates in three modes, the advantages and disadvantages of these modes being analyzed. Annealing after welding, accompanied by heating to a temperature of 450–470° C and holding for 30 s (recommended by Rentgen – the CR400 steel manufacturer) causes a gradual equalization of the hardness distribution. In the CR400 steel, containing chromium and tungsten at the lower allowable limit (3,5% and 5,3%, respectively), complete recovery of hardness after annealing is not observed. Fluctuation in hardness reach 30–35%, which negatively affects the strength of the saw. To eliminate this shortcoming, it is necessary to equalize the hardness, which can be provided by a special thermal strengthening. It is proposed to develop modes of laser thermal strengthening of the weld after the welding process, which will significantly increase the strength of the tool.

Keywords: band saw, laser welding, metal structures, welding mode.