

Віктор Романенко¹, Михайло Блощизин², Іван Жегет³, Юрій Юрченко⁴

¹кандидат технічних наук, доцент кафедри лазерної техніки та фізико-технічних технологій
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: romvvv@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1918-7090>

²кандидат технічних наук, доцент кафедри лазерної техніки та фізико-технічних технологій
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: m.bloshchytsyn@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3688-7948>

³магістр кафедри лазерної техніки та фізико-технічних технологій
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: i.zheget-ml71@iit.kpi.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7504-6490>

⁴магістр кафедри лазерної техніки та фізико-технічних технологій
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: yuriyyurchenko14@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9253-009X>

**КОНСТРУКТИВНІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ВДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ
ЛАЗЕРНОЇ РІЗКИ МЕТАЛІВ**

Наведено аналіз існуючих способів лазерного різання та представлено особливості конструктивного та технологічного вдосконалення процесу. Розширення функціональності наявного на ринку обладнання може бути здійснено за рахунок застосування двох або більше лазерних головок. Розроблена комбінована технологія, де листовий метал піддається механічній активації перед лазерним різанням, що полягає у холодній пластичній деформації. При цьому відбувається зниження теплопровідності металу за рахунок його деформаційного зміцнення і, як наслідок, зменшення (локалізація) зони термічного впливу в зоні різання. Представлене технологічне рішення дозволяє знизити вартість виробу за рахунок зниження трудомісткості подальших слюсарних робіт у результаті підвищення точності розмірів і зниження шорсткості поверхні різі та значно зменшити ширину отриманого різі.

Ключові слова: лазер; технологічний процес; теплопровідність; різка; пластична деформація; схема обробки.
Рис.: 7. Табл.: 1. Бібл.: 12.

Актуальність теми дослідження. Широке застосування маловідходних технологічних процесів у різних галузях промисловості є одним із найбільш важливих завдань сучасної промисловості. У зв'язку з цим важливою є проблема створення високопродуктивних і маловідходних операцій розрізання матеріалів, широко вживаних у машинобудуванні та приладобудуванні. Таке завдання особливо гостро стоїть при обробці деталей зі складним контуром із важкооброблюваних матеріалів. Вирішення цієї проблеми вимагає розробки принципово нових технологічних процесів, відмінних від традиційних методів розкрою матеріалів. До таких технологій належить лазерне різання матеріалів.

Постановка проблеми. Лазерна різка вигідно відрізняється від існуючих методів розділення матеріалів, наприклад, кисневого або плазмового різання, оскільки при більш високій продуктивності процесу дозволяє виконувати розрізи значно меншої ширини (приблизно $1/5$ ширини різі при кисневому або плазмовому різанні) та підвищеної якості різів, що, з одного боку, різко знижує неповоротні втрати матеріалу, з іншого боку, дозволяє виключити необхідність подальшої обробки крайок розрізів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Нині лазерне різання металів, зокрема листових, постійно вдосконалюється і модернізується. При цьому для прискорення процесу лазерного різання можна запропонувати використовувати машини із двома лазерними головками, які синхронно переміщуються по обидва боки матеріалу, що різеться. Для цього може використовуватися одне лазерне джерело, промінь якого розділений відповідними дзеркалами [1], або двома окремими лазерними джерелами [2; 3]. Така схема пристрою дозволяє збільшити швидкість різання, особливо в разі відносно товстих матеріалів, але вимагає точної комбінації променів по вертикалі й синхронного руху обох лазерних головок.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Відомий верстат для лазерного різання матеріалів, в якому два лазерних промені рухаються один за одним, щоб прискорити процес різання або сформувати складний профіль прорізу [4]. Існує також установка, у якій обидві головки рухаються синхронно в одному напрямку з можливістю регулювання відстані між ними, що дає можливість одночасно виробляти одразу дві однакові деталі [5]. Однак у цьому випадку жорстке з'єднання лазерних головок обмежує функціональність верстата.

Метою статті є визначення можливостей удосконалення процесу лазерного різання металів із можливістю спрощення технологічної реалізації процесу.

Виклад основного матеріалу. Більш раціональне вирішення проблеми полягає в розширенні функціональності обладнання, що дозволяє двом або більше лазерним головкам самостійно працювати на одній машині [6]. Такий станок для лазерного різання матеріалів, що складається з основи, поздовжньої напрямної, що кріпляться на основі та двох поперечних напрямних, кожна з яких монтується на поздовжній напрямній з можливістю самостійного руху по цій напрямній за допомогою власного приводу поздовжнього руху. При цьому на кожній із поперечних напрямних встановлюється лазерна головка з можливістю самостійного руху по цій поперечній напрямній за допомогою власного горизонтального приводу переміщення і власного вертикального привода. В конструкцію входить обчислювальний пристрій, до якого приєднані горизонтальний та вертикальний приводи руху лазерної головки. Привід поперечного переміщення налаштований із можливістю самостійного програмного управління горизонтальним та вертикальним рухом лазерної головки і поздовжніх рухів приводів поперечної та поздовжньої напрямної. При цьому кожен з приводів руху лазерної головки виконаний у вигляді лінійного електродвигуна, встановленого по відповідній напрямній.

Ще однією особливістю такої машини є те, що обчислювальний засіб налаштовуються з можливістю управління обома лазерними головками по шести координатам. Установка може також виконувати шестикоординатне управління обома лазерними головками.

Розроблена конструкція може бути реалізована для різання листових матеріалів. Машини в цьому варіанті, як показано на рисунку 1, має основу 1, на якій жорстко закріплена поздовжня напрямна 2. Крім того, поздовжніх напрямних може бути і дві, які встановлюються паралельно одна одній.

Як показано на рисунку 1, поперечні напрямні 3 встановлюються на поздовжню напрямну 2. На кресленні показано дві поперечні напрямні 3, але чисельність їх може бути різним. Наприклад, на одну поздовжню напрямну 2 можна встановити три поперечні напрямні 3. Кожна з поперечних напрямних 3 монтується на відповідну поздовжню напрямну 2 з можливістю самостійного руху по поздовжній напрямній 2. Таке переміщення забезпечується власним поздовжнім приводом поперечної напрямної, який являє собою лінійний електродвигун.

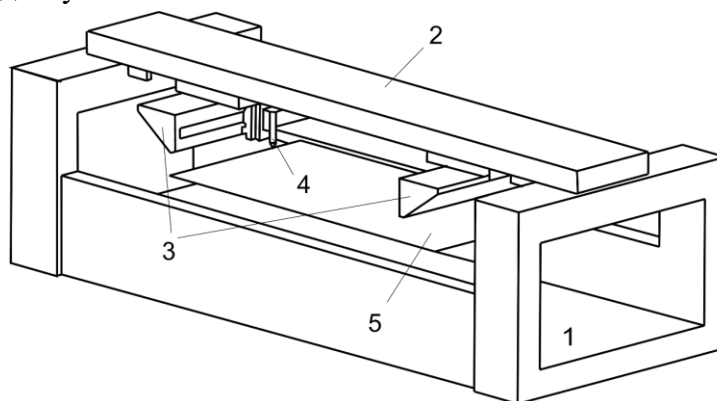


Рис. 1. Реалізації машини для лазерного різання матеріалу

На рисунку 1 обидві поперечні напрямні 3, монтуються таким чином, що кожен із приводів поперечної напрямної розташований на нижній стороні поздовжньої напрямної 2. Однак це не є обов'язковою умовою. Наприклад, якщо поперечна напрямна 3 виконана з кронштейном, що покриває поздовжню напрямну 2, привід поздовжнього переміщення поперечної напрямної може бути розміщений на верхній стороні поздовжньої напрямної 2. Специфічні характеристики підвіски поздовжньої напрямної 2 і розміщення поздовжнього привода поперечної напрямної визначаються розташуванням і конструктивними особливостями машини, зручністю її обслуговування і т. ін.

Як видно з рисунку 1, кожна поперечна напрямна 3 має лазерну головку 4, встановлену з можливістю самостійного переміщення по цій поперечній напрямній. Таке зміщення забезпечується власним горизонтальним приводом переміщення і власним вертикальним приводом переміщення, кожен з яких виконаний так само, як і поздовжній привід переміщення поперечної напрямної.

Слід враховувати, що дві або більше лазерних головок 4 можуть бути встановлені на одній поперечній направляючій 3, кожна з яких має свій горизонтальний і вертикальний привід переміщення. Наприклад, дві лазерні головки 4 можуть бути розташовані на протилежних плечах однієї поперечної напрямної.

Як показано на рисунку 1, поперечні напрямні 3 можуть бути одна по відношенню до другої в такому положенні, що відповідні лазерні головки 4 розташовані в межах максимальної відстані в поздовжньому напрямку. Здебільшого ця відстань для верстатів різання листів відповідає (або навіть трохи перевищує) поздовжній розмір листа матеріалу 5, що розрізається.

Використання декількох (не менше двох) лазерних головок 4, що переміщуються кожна по власній поперечній напрямній 3, дозволяє не тільки прискорити процес різання, але й забезпечує можливість одночасно вирізати кілька різних деталей або отворів з одного листа чи більшої кількості листів. Щоб реалізувати цю можливість, кожна головка повинна рухатися по своїй траєкторії (за трьома координатами), яка обслуговується як власним приводом горизонтального і вертикального переміщення, так і приводом поздовжнього руху поперечної напрямної 3. Ці приводи управляються відповідними обчислювальними пристроями з ЧПУ або програмованим контролером, процесором, комп'ютером і т. ін. Усі горизонтальні і вертикальні приводи руху лазерної головки 4 та всі поздовжні рухи поперечної напрямної 3 підключені до цього обчислювального засобу, який налаштований на самостійне програмування управління кожним з цих переміщень.

Зокрема, коли машина складається з однієї поздовжньої напрямної і двох поперечних напрямних та кожна має по одній лазерній головці, то зазначена програма може забезпечити шестикоординатне управління обома лазерними головками, тобто трикоординатне управління для кожної лазерної головки. Конкретний тип розроблюваної програми визначається як необхідною траєкторією різки, так і використовуваною мовою програмування.

Для здійснення операції різки листовий матеріал 5 укладається на основу 1. У комп'ютер вводиться відповідна програма, у якій враховуються всі лінії необхідних надрізів, щоб поперечні напрямні 3 і лазерні головки 4 у жодному разі не стикалися при їх рухах під час роботи.

Наприклад, якщо ви хочете вирізати двері з вікном з листа 5, то програму управління різанням можна спроектувати так, щоб перша (скажімо, ліва на рисунку 1) лазерна головка прорізала верхню частину дверей, а потім приступила до прорізання однієї зі сторін. При цьому друга (праворуч на рисунку 1) лазерна головка спочатку вирізає віконце, і передусім його верхню частину, а потім, після завершення вирізання віконця, друга (права) лазерна головка починає прорізати сторону приблизно із середини (ту, яку вже вирізала перша лазерна головка), а потім переходить до прорізування нижньої сторони.

У цей час перша головка перестає прорізати свою бічну сторону, рухається в іншу сторону в точку, де розріз був початий другою (правою) лазерною головкою, і прорізає цю сторону до кінця в напрямку вже прорізаної верхньої сторони дверей. Друга лазерна головка, завершивши надріз нижньої сторони дверей, переходить до прорізування бічної сторони, яка залишилася нерозрізаною першою лазерною головкою, і завершує розріз цієї сторони. У результаті обидві поперечні напрямні 3 не стикаються в процесі експлуатації, а час різання скорочується більш ніж наполовину, враховуючи той факт, що при різанні на звичайній машині з однією лазерною головкою потрібно деякий час на невиробниче переміщення лазерної головки з одного розрізу в інший. У цьому ж станку при переміщенні однієї поперечної напрямної 3 з відповідною лазерною головкою 4, інша лазерна головка 4 може продовжувати різання листа 5.

Звичайно, якщо необхідно не наскрізно прорізати матеріал, будь-яка лазерна головка 4 може рухатися по висоті (тобто по третій координаті) за допомогою вертикального приводу руху лазерної головки.

Таким чином, у наведеному конструктивному рішенні виконується одночасне шестикоординатне управління двома лазерними головками, що й забезпечує розширення функціональності, а також прискорення процесу різання.

Водночас недоліками традиційного методу контурного лазерного різання є невисока якість крайок різку внаслідок утворення ґрату, недотримання форми і розмірів деталі внаслідок низької якості бічної поверхні різку (не перпендикулярність і висока шорсткість), поверхневе короблення металу, обмежений асортимент матеріалів і діапазон товщин металу. Крім того, теплова енергія, що виділяється в процесі лазерного різання, створює зону температурного впливу на краю крайок різків [7].

Для поліпшення якості лазерного різання рекомендується зменшити тепловий вплив на метал заготовки з метою зниження теплопровідності. Раніше розроблений метод контурного лазерного різання, при якому охолодження зони різання здійснюється за допомогою охолоджуючої рідини, розпорошеної разом із потоком газу, що дозволяє знижувати теплопровідності металу заготовки [8].

Істотним недоліком такого методу є складна конструкція лазерної установки, яка повинна мати механізм подачі й видалення охолоджуючої рідини, недостатня ефективність процесу охолодження, а також зниження корозійної стійкості металу на залізній основі.

Тому була розроблена комбінована лазерна установка, технічним результатом якої є підвищення ефективності процесу розділу листового металу, розширення його технологічних можливостей при забезпеченні низької витрати матеріалу й високої якості продукції [9].

Технічний результат досягається тим, що листовий метал піддається механічній активації перед лазерним різанням, що полягає у холодній пластичній деформації, при якій відбувається зниження теплопровідності металу і, як наслідок, зменшення (локалізація) зони термічного впливу в зоні різання.

Суть процесу полягає в тому, що зниження теплопровідності в зоні різання досягається за рахунок процесу механічної активації прокату при нанесенні силової дії при холодній пластичній деформації [10]. При цьому забезпечується різке зниження теплопровідності металу за рахунок його деформаційного зміцнення. Спостережуваний ефект зумовлений ущільненням кристалічної решітки металу, збільшенням густини дислокацій при пластичній деформації (механічна активація металу заготовки).

Метод контурного лазерного різання з механічною активацією листового металу може бути здійснений за такими етапами:

1. Виконується холодна пластична деформація оброблюваної поверхні прокату будь-яким традиційним способом (валками, ударною дією тощо). На цьому етапі утворюється сприятлива текстура (макро-, і -мікро) в області зони подальшої контурної лазерної різки,

відбувається активація і механічний наклеп (деформаційне зміцнення), що знижує теплопровідність металу в зоні різання і знижує температурний вплив на метал шляхом створення більш локальної зони температурного впливу.

2. Виконується контурне лазерне різання попередньо холоднодеформованої ділянки металопрокату (металевої заготовки).

На рисунку 2 показана технологічна схема розробленого процесу контурного лазерного різання з механічною активацією листового металу.

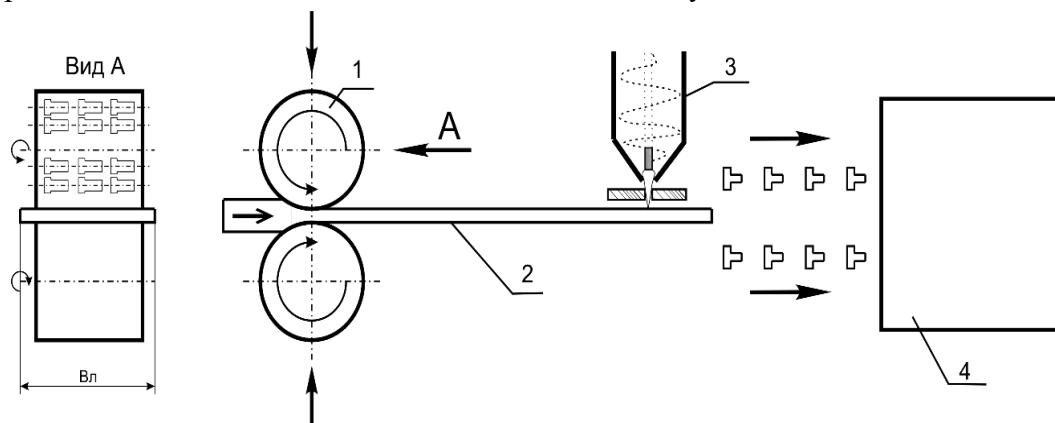


Рис. 2. Комбінована установка контурного лазерного різання з механічною активацією листового металопрокату

Деформаційне зміцнення листового металу здійснюється за допомогою деформуючих валків 1, здійснюючих різноспрямований обертальний рух, які забезпечують холодну пластичну деформацію вихідного листового матеріалу 2 у зонах подальшого розрізання згідно з кресленням. Валки 1 можуть бути оснащені клиноподібними ребрами, траєкторія яких відповідає контуру розрізаної деталі (вид А), що забезпечує локальне зміцнення вузької зони деформованого металу. Крім того, така схема холодної деформації оброблюваної ділянки забезпечить високий рівень пластичності контуру відрізаної заготовки, якщо заготовка піддається подальшому штампуванню. У положенні 3 проводиться контурне лазерне різання. Вирізані заготовки відправляються на місце штампування 4.

Таке представлене технологічне рішення дозволяє знизити вартість виробу за рахунок зниження трудомісткості подальших слюсарних робіт в результаті підвищення точності розмірів і зниження шорсткості поверхні різку та значно зменшити ширину отриманого різку.

Отже, метод контурного лазерного різання з механічною активацією листового металу полягає в тому, що листовий метал піддається холодній пластичній обробці перед лазерною різкою. При цьому поверхня обробки в зоні розрізу піддається силовій дії в деформуючих валках, оснащених клиноподібними ребрами, траєкторія яких узгоджена з контуром зрізаної частини.

Для реалізації лазерної різки металів з попередньою пластичною деформацією використовувалось таке обладнання. По-перше, нами використовувався вальцювальний верстат фірми Holzmann моделі RBM 1300M 26179088 (рисунок 3).



Рис. 3. Вальцювальний станок Holzmann RBM 1300M 26179088

У таблиці наведено основні технічні характеристики вальцювального верстата фірми Holzmann моделі RBM 1300M 26179088 [11].

Таблиця – технічні характеристики вальцювального верстата фірми Holzmann моделі RBM 1300M 26179088

Виробник	<u>Holzmann Maschinen</u>
Тип приводу	Електричний
Напруга живлення, В	380
Потужність, Вт	1100
Макс. товщина листа, мм	1.5
Макс. ширина листа, мм	1300
Діаметр валків, мм	75
Кількість валків, шт.	3
Габарити, мм	1800×650×1100
Вага, кг	280
Родина бренду	Німеччина

Подальше розрізання матеріалу виконувалось на верстаті для лазерного різання серії LTC75 фірми Aramis (Україна) (рисунок 4). Представлений верстат є високопродуктивним і надійним інструментом, призначеним для високоточного розкрою листового матеріалу [12].



Рис. 4. Верстат для лазерного різання LTC75

Нижче представлені основні технічні характеристики запропонованого лазерного комплексу для різки матеріалів:

Лазерне джерело:

Тип лазера – Ітербієвий лазер;

Передача променя – Оптичне волокно;

Діаметр плями сфокусованого випромінювання – 0,07-0,15 мм;

Середня потужність випромінювання – 1000, 2000 або 3000 Вт;

ККД лазерного джерела – не менше 30 %.

Система руху:

Кінематична схема – Портальна, лист нерухомий;

Базові варіанти розмірів поля обробки – 3000×1500 мм;

Тип приводу координат X,Y – Лінійний привід;

Тип приводу координати Z – Сервопривід;

Точність позиціонування за координатами (X, Y) – ± 0.01 мм;

Максимальна швидкість переміщення – 100 м/хв.

Як ми й очікували, при розрізанні тих самих листів металів без попереднього деформційного зміцнення листового металу та по запропонованій схемі (з механічною деформацією листів) відбувається, в першу чергу, зменшення ширини різів. На рисунку 5 представлено фото вигляду різів зверху металевого листа, виконаних по двох цих схемах обробки, яке підтверджує це. З рисунку 5 також видно, що при застосуванні попередньої деформації зменшується не тільки ширина отриманого розрізу металу, а й величина зони термічного впливу (ЗТВ) на його краяхках.

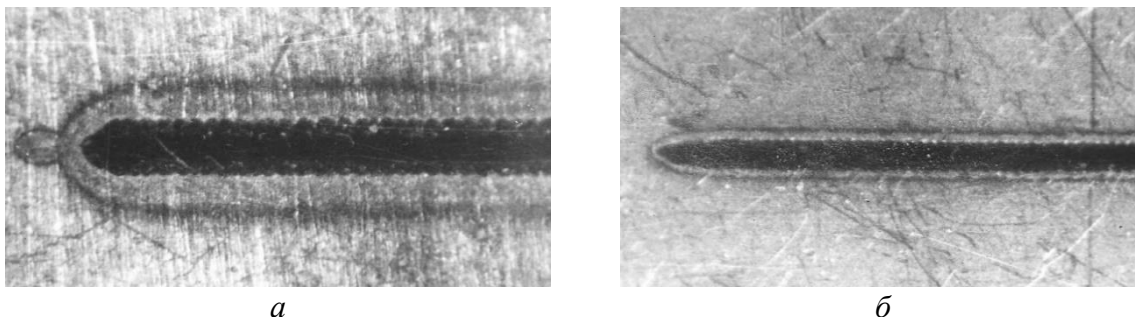


Рис. 5. Величина ширини різів та видимого сліду (ЗТВ) на верхній поверхні металу при різці без (а) та з попереднім деформуванням металу (б)

Водночас розгляд вигляду поверхні різів, виконаних по обох цих схемах обробки, показує, як змінюється вигляд та величина шорсткості поверхні різів (рис. 6).

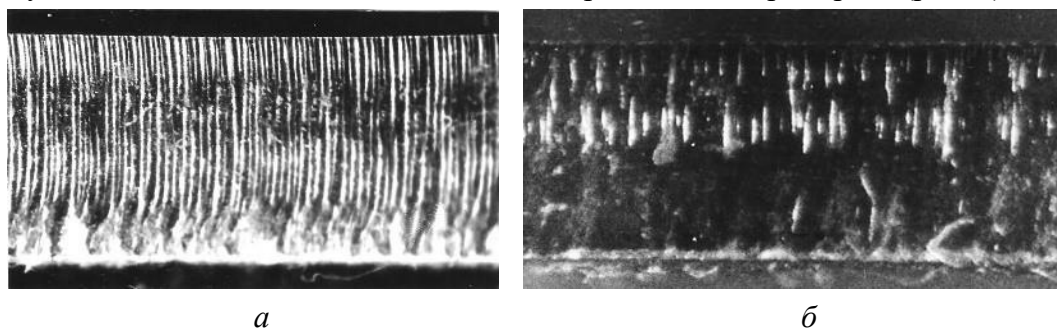


Рис. 6. Вигляд поверхні різів при різці без (а) та з попереднім деформуванням металу (б)

При застосуванні попередньої механічної деформації поверхня лазерного різіу набуває більш литий вигляд, без гострих виступів. При цьому зменшується величина мікросорткості з величини $R_z = 30 \dots 40$ мкм до величини $R_z = 10 \dots 20$ мкм.

Виконані пошукові експерименти показали, що ширина поверхні різіу на верхній поверхні металу в залежності від швидкості розрізання зменшується при застосуванні попередньої активації металу за рахунок механічного деформування (рис. 7).

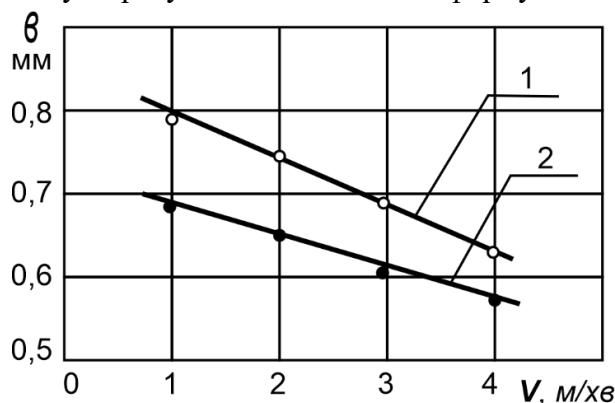


Рис. 7. Залежність ширини різіу на верхній поверхні металу від швидкості різіування без (крива 1) та з попереднім деформуванням металу (крива 2).

Висновки. Розроблені конструктивні та технологічні вдосконалення методу лазерного різіування металів дають можливість реалізувати, як підвищення продуктивності процесу лазерного розрізання металів, так і зростання якості отриманих крайок різів.

Список використаних джерел

1. Патент США № 6576870, опубл. 10.06.2003.
2. Патент США № 6313433, опубл. 06.11.2001.
3. Патент на корисну модель Китаю № 2661357, опубл. 08.12.2004.
4. Патент на корисну модель Китаю № 201257862, опубл. 17.06.2009.
5. Патент на корисну модель Китаю № 201338160, опубл. 04.11.2009.
6. Патент на корисну модель Китаю № 246890371, опубл. 14.06.2017.
7. Коваленко В. С. Малоотходные процессы резки лучом лазера / В. С. Коваленко, В. В. Романенко, Л. М. Олещук. – К. : Техніка, 1987. – 112 с.
8. Патент на корисну модель Китаю № 201338162 опубл. 04.11.2009.
9. Заявка на патент США № 2010/0044353, опубл. 25.02.2010.
10. Man H.C. Dynamic characteristics of gas jets from subsonic and supersonic nozzles for high pressure gas laser cutting / H. C. Man, J. Duan, T. M. Yue // Optics & Laser Technology. – 2018. – Vol. 30. – Pp. 497-509.
11. Основні характеристики вальцювального верстата RBM 1300M Maschinen 26179088, фірми Holzmann, Німеччина [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http:// abplanalp.ua.html](http://abplanalp.ua.html).
12. Основні характеристики лазерного верстата для різіування (AFL), фірми Aramis, Україна. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://aramis.com.ua/laser-cut-afl.html>

References

1. Patent SShA № 6576870, opubl. 10.06.2003.
2. Patent SShA № 6313433, opubl. 06.11.2001.
3. Patent na korysnu model Kitaiu № 2661357, opubl. 08.12.2004.
4. Patent na korysnu model Kitaiu № 201257862, opubl. 17.06.2009.
5. Patent na korysnu model Kitaiu № 201338160, opubl. 04.11.2009.
6. Patent na korysnu model Kitaiu № 246890371, opubl. 14.06.2017.
7. Kovalenko, V.S., Romanenko, V.V., & Oleshchuk, L.M. (1987). *Malootkhodnye protsessy rezky luchom lazera [Low-waste laser cutting processes]*. Tekhnika.
8. Patent na korysnu model Kitaiu № 201338162 opubl. 04.11.2009.
9. Zaiavka na patent SShA № 2010/0044353, opubl. 25.02.2010.

10. Man, H.C., Duan, J., Yue, T.M. (2018). Dynamic characteristics of gas jets from subsonic and supersonic nozzles for high pressure gas laser cutting. *Optics & Laser Technology*, 30, 497-509.

11. Osnovni kharakterystyky valtsiuvalnoho verstata RBM 1300M Maschinen 26179088, firmy Holzmann, Nimechchyna. [http:// abplanalp.ua.html](http://abplanalp.ua.html).

12. Osnovni kharakterystyky lazernoho verstata dlia rizannia (AFL), firmy Aramis, Ukraina. <http://aramis.com.ua/laser-cut-afl.html>.

Отримано 31.01.2023

UDC 621.375.826:621

Victor Romanenko¹, Mykhaylo Bloshchytyn², Ivan Zheget³, Yuriy Yurchenko⁴

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Laser Systems and Physical Technologies National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)

E-mail: romvvv@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1918-7090>

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Laser Systems and Physical Technologies National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)

E-mail: m.bloshchytyn@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-3688-7948>

³Master of the Department of Laser Systems and Physical Technologies National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)

E-mail: i.zheget-ml71@iit.kpi.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7504-6490>

⁴Master of of the Department of Laser Systems and Physical Technologies National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)

E-mail: yuriyyurchenko14@gmail.com. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-9253-009X>

DESIGN AND TECHNOLOGICAL IMPROVEMENTS OF THE PROCESS OF LASER CUTTING OF METALS

An analysis of the existing methods of laser cutting is given and the features of constructive and technological improvement of the process are presented. The technology of laser cutting of metals, in particular sheet metal, is constantly being improved and modernized. Expanding the functionality of existing equipment on the market can be done by using two or more laser heads. The laser heads move synchronously and are programmatically coordinated among themselves in six coordinates. This allows not only to increase the speed of the cutting process, but also provides the possibility of simultaneously cutting several different parts or holes from one sheet or more sheets, which ensures the expansion of functionality, as well as the acceleration of the cutting process.

At the same time, the disadvantages of the traditional method of contour laser cutting are the low quality of the cut edges. To improve the quality of laser cutting, it is recommended to reduce the thermal effect on the metal of the workpiece with the help of a cooling liquid sprayed along with the gas flow, which allows to reduce the thermal conductivity of the metal of the workpiece. A significant drawback of this method is the complex design of the laser installation. Taking into account other disadvantages of the traditional contour laser cutting method (non-perpendicularity and high roughness) and the possible range of metal thicknesses, a combined laser cutting method was proposed. A combined laser installation was developed, where sheet metal is subjected to mechanical activation before laser cutting, which consists in cold plastic deformation. At the same time, the mechanical activation of the metal sheet occurs, which leads to a decrease in the thermal conductivity of the metal due to its deformation hardening and, as a result, a reduction (localization) of the zone of thermal influence in the cutting zone. The observed effect is due to the compaction of the crystal lattice of the metal, the increase in the density of dislocations during plastic deformation. When applying preliminary deformation, not only the width of the cut in the metal is reduced, but also the roughness of the cut surface and the size of the thermally affected zone at its edges.

The presented technological solution makes it possible to reduce the cost of the product by reducing the labor intensity of further metalwork as a result of increasing the accuracy of dimensions and reducing the roughness of the cut surface and significantly reducing the width of the cut.

Keywords: laser; technological process; thermal conductivity; cutting; plastic deformation; diagram of treatment.

Fig.: 7. **Table:** 1. **References:** 12.