

**В.І. Осипенко, О.П. Плахотний, М.Р. Прусс, С.П. Середюк**

*Черкаський державний технологічний університет*

## **ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНИХ РЕЖИМІВ РІЗАННЯ СТАЛЕЙ ВИПРОМІНЮВАННЯМ ПОТУЖНОГО ОПТОВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА**

*В роботі запропоновано методики та експериментально досліджено вплив параметрів лазерного променя та лазерного процесу при різанні листової сталі ВСтЗсп стандартного ряду товщин випромінюванням оптоволоконного лазера потужністю 2000 Вт в середовищі кисню на продуктивність та якість різання. Експериментально обґрунтовано діапазон збалансованих параметрів, які забезпечують високу продуктивність процесу та кількісно контрольовану якість поверхонь різі, яка відповідає вимогам стандарту ISO 9013:2017.*

*Ключові слова: оптоволоконний лазер, лазерне різання, лазерний промінь, положення фокусу, тиск асистуючого газу, шорсткість поверхні, допуск перпендикулярності, вуглецева сталь.*

**V.I. Osypenko, O.P. Plakhotnyi, M.R. Pruss, S.P. Seredyuk**

## **EXPERIMENTAL JUSTIFICATION OF EFFECTIVE MODES OF STEEL CUTTING BY THE RADIATION OF A POWERFUL FIBER LASER**

*The paper proposes methodologies and experimentally investigates the influence of laser beam parameters and the laser cutting process on sheet steel ВСтЗсп of standard thicknesses, using a 2000 W fiber laser in an oxygen environment, on the cutting efficiency and quality. The study experimentally justifies the range of balanced parameters that ensure high process efficiency and quantitatively controlled cut surface quality, which complies with the requirements of ISO 9013:2017. The established cutting modes are the basis of the section of the technological instructions for serial machines of the AFX-PRO-2000-1530LD model line. The good reproducibility of the established modes was experimentally confirmed. Directions for further research using the obtained curves of the Abbott-Firestone stability coefficient are proposed.*

*Keywords: fiber optic laser, laser cutting, laser beam, focus position, assist gas pressure, surface roughness, perpendicularity tolerance, carbon steel.*

**Постановка проблеми.** Накопичена компанією «Арамис» за останні 5 років статистика показує, що газолазерне різання сталей товщиною 1-20 мм з досить високими вимогами до продуктивності процесу та шорсткості бокової поверхні є найбільш затребуваним промисловістю сучасної України. Вимоги по шорсткості, як правило, включають обмеження висоти мікронерівностей та виключення наявності застиглої рідкої фази у вигляді ґрату. В окремих випадках вводяться обмеження на конусність бокових поверхонь та різницю ширини різі в верхній та нижній площинах поперечного перетину поверхні різання. В переважній більшості випадків для різання вуглецевих конструкційних листових сталей використовуються технологічні установки укомплектовані оптоволоконними лазерами потужністю 2 кВт. Найбільш високі показники продуктивності процесу різання досягають за використання кисню в якості асистуючого газу. Це пов'язано з тим, що при обробці вуглецевих сталей кисень викликає потужну екзотермічну реакцію, яка забезпечує зростання продуктивності та максимальної глибини розрізання. Західні та японські фірми проводять різання спеціальних, так званих лазерних сталей. Підприємства сучасної України в основному різуть конструкційну сталь 3, яка за рядом якісних параметрів відрізняється від конструкційних лазерних сталей. Тому принципи та результати наведені в багаточисельних наукових публікаціях не завжди можна визнати достатньо експериментально обґрунтованими. Навіть конкретні технологічні рекомендації надані відомими дослідницькими центрами, за використання підприємствами України, вимагають від українських виробників лазерних технологічних установок суттєвої корекції. Це стосується як продуктивності процесу так і якості бокової поверхні. Ефективна корекція можлива лише як результат добре спланованих, системних експериментальних досліджень процесу газолазерного різання сталі 3 та встановленням конкретних технологічних умов, що забезпечують високу продуктивність процесу за відповідної вимогам споживача якості бокових поверхонь.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Лазерне різання низьковуглецевої сталі з використанням в якості асистуючого газу кисню є одним найбільш поширених і, можливо, найбільш складних застосувань [1, 2]. Вплив температури променя лазера та екзотермічна реакція кисню із залізом у сталі забезпечують потужність, необхідну для плавки матеріалу з необхідною швидкістю та збільшують товщину різання. Залежність швидкості різання від товщини матеріалу не є лінійною. По мірі зростання товщини матеріалу швидкість різання знижується [3]. Вхідні параметри лазерного різання прийнято поділяти на дві основні групи: параметри променя та процесу [4, 5, 6]. Параметри

променю описують властивості лазерного променю, які складаються з величини та характеру розподілу густини потужності в плямі, довжини хвилі, розміру плями, імпульсної потужності, режиму променю. Параметри лазерного процесу - це положення фокусу, геометричні параметри сопла, тип асистуючого газу та його тиск, висота різання (відслідковуваний зазор), швидкість різання. Більшість дослідників вважають за краще контролювати потужність лазерного променю, швидкість різання та тиск допоміжного газу, оскільки ними можна легко керувати, і вони є найбільш ефективними параметрами впливу для більшості вимірюваних результатів якості поверхні [6]. Асистуючий газ служить для здування рідкого матеріалу із зони різання, тому якщо тиск кисню занадто низький, то матеріал не видалятиметься досить швидко. Оскільки швидкість реакції також залежить від тиску кисню, то занадто великий тиск може викликати надмірне горіння і плавлення, в результаті чого рідкий матеріал також не встигатиме видалятися з розрізу. Щоб забезпечити нормальне різання, необхідно дотримуватися балансу тиску асистуючого газу і швидкості різання. Такий баланс в кожному конкретному технологічному випадку встановлюють експериментально [5]. Варто відзначити, що за даними, наведеними в роботах [2] на інтенсивність процесу горіння вагомий вплив має чистота кисню. Фокусне положення променю лазера також значною мірою впливає на процес різання [4]. Якщо фокус знаходиться надто близько до поверхні, розріз стає занадто вузьким, і тому стає неможливим нормальне протікання допоміжного газу через розріз для видалення рідкого матеріалу. Окрім того, таке положення фокусу може призвести до надмірного випаровування рідкого металу, що також призведе до зміни потоків газу та рідини та порушення правильного балансу між тиском допоміжного газу та швидкістю різання. Якщо фокус знаходиться надто далеко до поверхні, розріз стає занадто широким, і для підтримки бажаної швидкості різання недостатньо потужності. Відносна важливість цих факторів збільшується зі збільшенням товщини листа. Виконаний в роботі [7] критичний огляд публікацій показав, що по відношенню до параметрів якості поверхні найбільш досліджуваним параметром є шорсткість. Другим в переліку досліджуваних параметрів є ширина різі. Вона має два параметри, які є ширинами різі на верхній та нижній частинах поперечного перетину поверхні різання. Ширина верхнього різі більша за ширину нижнього різі, оскільки потужність на верхній поверхні більша, ніж на нижній. Допуск перпендикулярності або нахилу є третім в переліку досліджуваних параметрів. Пріоритет даних параметрів обумовлений тим, що вони є визначальними при вирішенні питання потребує отримана деталь подальшої обробки чи ні. А це наряду зі швидкістю різання по суті визначає економічну ефективність технології. Наведені дані показують нагальну потребу комплексних експериментальних досліджень газолазерного різання сталі 3 в середовищі кисню, аналізу їх результатів, обґрунтування найбільш ефективних параметрів з точки зору продуктивності процесу та якості отриманих деталей.

**Мета статті** – експериментальне визначення раціональних параметрів лазерного променю та лазерного процесу, які гарантовано, з високим рівнем відтворюваності, забезпечують високу продуктивність газолазерного різання листової сталі 3 та відповідність вимогам замовників до якості деталей.

Для досягнення поставленої мети необхідне вирішення таких задач: 1) провести аналіз відомих результатів досліджень процесу газолазерного різання низьковуглецевих сталей випромінюванням оптоволоконних лазерів; 2) на основі виконаного аналізу визначити факторний простір та розробити план проведення експериментів; 3) відповідно до розробленого плану провести комплекс експериментів та аналіз їх результатів; 4) обґрунтувати ефективні режими газолазерного різання сталі 3 випромінюванням оптоволоконного лазера потужністю 2 кВт з використанням в якості асистуючого газу кисню.

#### **Виклад основного матеріалу.**

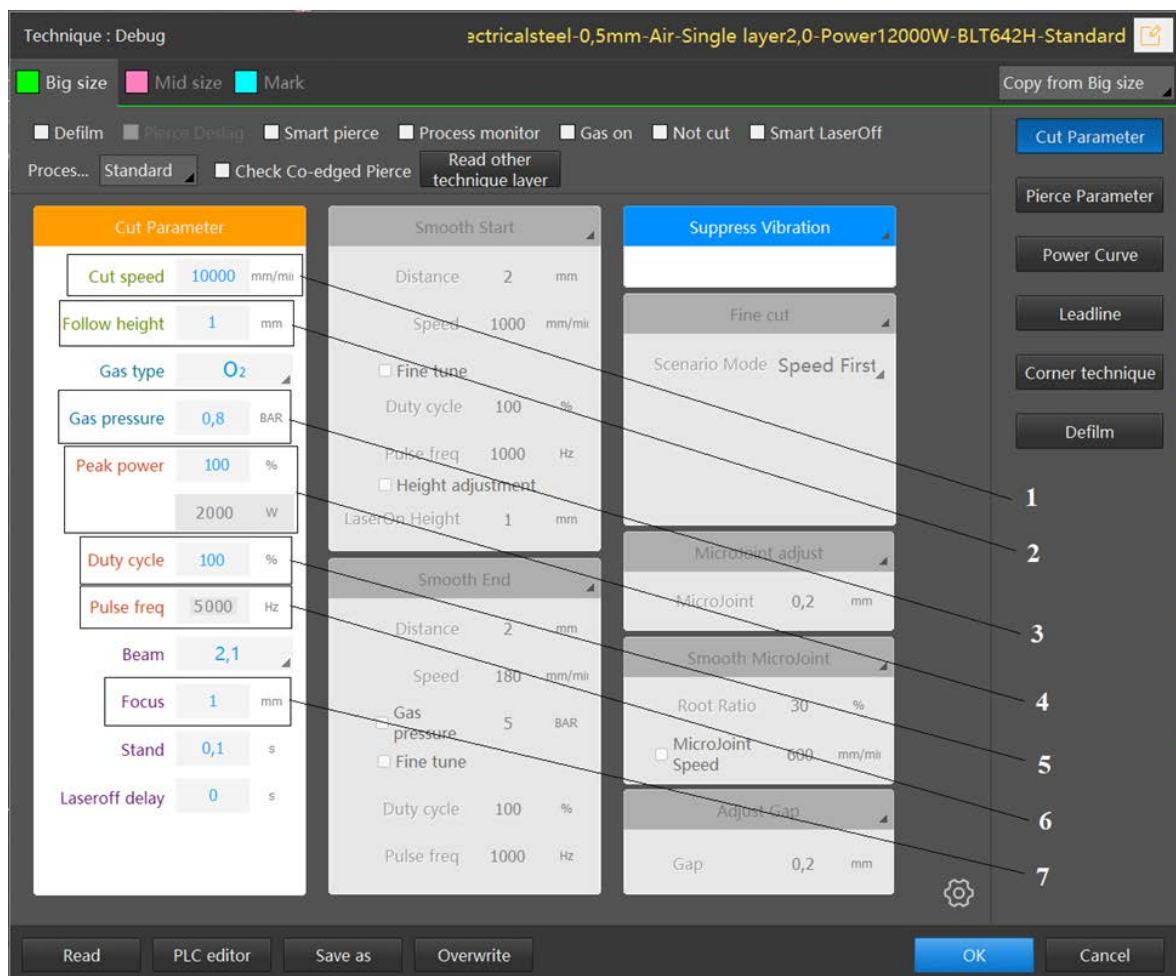
**Обладнання, та методи дослідження.** Експерименти виконувалися на серійному верстаті компанії «Арамис», провідного виробника лазерних технологічних установок в Україні. Основні інформація про верстат наведена в таблиці 1.

Табл. 1

**Моделі основних систем верстата для проведення досліджень**

Верстат	AFX-PRO-2000-1530-LD
Модель лазера, Ø оптоволоконна	MAX Photonics 2 kWt, оптоволоконно 100 мкм
Модель оптичної головки, коліматор	BOCS BLT642, f 200 мм

Оброблялася листовая сталь СтЗсп стандартного ряду товщин (мм) 1; 1,5; 2; 3; 4; 5; 6; 8; 10; 12; 14; 16. Спираючись на матеріали попередніх досліджень [8] в оптичній головці верстата встановлювалися серійні двоканалні сопла компанії Thermaxcut з вихідними діаметрами центрального отвору 1 мм; 1,2 мм; 1,5 мм; 2 мм; 3 мм в залежності від товщини листа. В кожному експерименті, виходячи з даних роботи [8] висота різання (відслідковуваний зазор) величиною 1 мм залишався незмінним. Діаметр лазерної плями в фокальній площині становив 200 мкм. В якості асистуючого газу використовувався кисень з чистотою 99,97. Вибір чистоти кисню обумовлений вимогами переважної більшості замовників даного типу верстата. Потужність лазерного променя, тиск газу, швидкість подачі, відслідковуваний зазор, положення фокусу задавалися і контролювалися системою числового програмного керування (ЧПК) з точністю, яка відповідає паспортним даним верстата (рис. 1).



1 – швидкість різання, мм/хв; 2 – відслідковуваний зазор, мм; 3 – тиск асистуючого газу, Бар; 4 – потужність лазерного променя, Вт; 5 – робочий цикл імпульсу (безперервний чи імпульсний цикл); 6 – робоча частота імпульсів, Гц; 7 – положення фокусу відносно торця сопла, мм;

**Рис. 1. Інтерфейс для внесення параметрів різання в програмі Nur CUT на станку AFX-PRO-2000-1530LD**

Зразки для досліджень вирізалися за кресленням представленим на рис. 2.

Профілографи поверхні лазерного різання дослідних зразків отримували за допомогою профілографа TIME 3221 (рис. 3, а). Програмне забезпечення дало змогу проводити багатопараметричний аналіз мікрогеометрії поверхні (рис. 3, б).

Базова довжина вимірювання вибиралася згідно з табл. 2. За один прохід можливо виконати ресстрацію профілю від 1 до 5 базових довжин, результат вимірювання осереднюється. В зразках товщиною 1; 1,5; 2 мм розділення поверхні різання на зони практично не виявлено. В решті зразків виконувалося тризонне вимірювання параметрів шорсткості (верх, середина, низ поверхні різання).

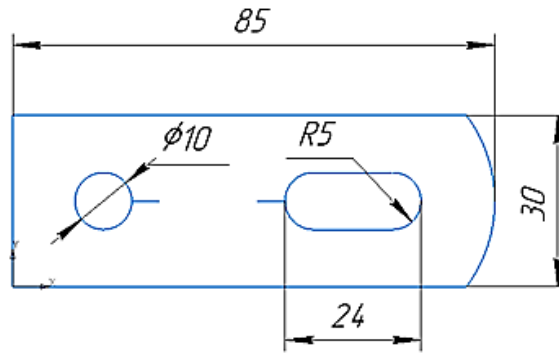
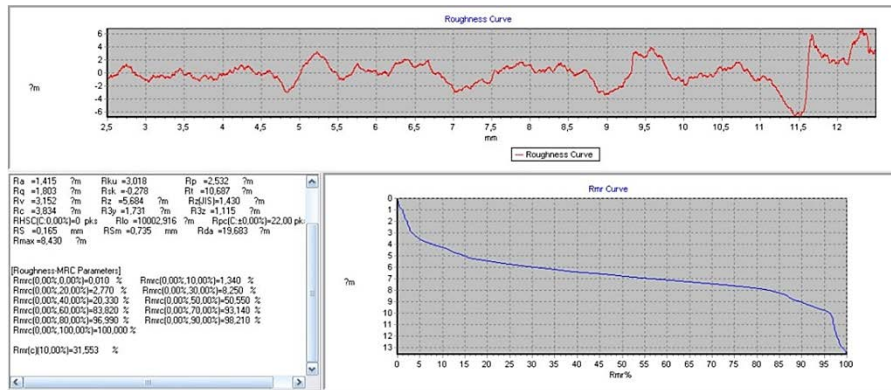


Рис. 2. Геометричні параметри зразків для досліджень



a)



б)

Рис. 3. Загальний вигляд стану з профілометром TIME 3221 (а); отримана профілограма поверхні різ та результати її аналізу у з використанням програмного забезпечення DataView TIME3R Series (б)

Табл. 2

Рекомендована виробником величина базової довжини в залежності від значень параметрів шорсткості, що вимірюються

Базова довжина	$Ra$	$Rz$
0,08 мм	$Ra \leq 0,02$ мкм	$Rz \leq 0,1$ мкм
0,25 мм	$0,02 \leq Ra \leq 0,1$ мкм	$0,1 \leq Rz \leq 0,5$ мкм
0,8 мм	$0,1 \leq Ra \leq 2,0$ мкм	$0,5 \leq Rz \leq 10$ мкм
2,5 мм	$2,0 \leq Ra \leq 10$ мкм	$10 \leq Rz \leq 50$ мкм

В загальному випадку розраховуються 45 параметрів відповідно до стандартів ISO 1997, ANSI і JIS2001. Застосовуються методи фільтрування 2RC, GAUSS. На основі параметра  $Rmr$  – відносної опорної довжини профілю отримана крива Еббота-Файрстоуна, яку називають ще кривою коефіцієнта стійкості до зношення поверхні і яка свідчить про рівень гостровершинності профілю поверхні. Згідно вимог ISO 9013:2017 як критерій оцінки якості поверхні аналізувався параметр шорсткості  $Rz$ . Як додатковий параметр, за вимогою замовників верстата, шорсткість отриманих поверхонь оцінювалася за параметром  $Ra$ .

Для реєстрації параметрів профілю поверхні різку та точного визначення перпендикулярності (нахилу) поверхні різання відповідно до ISO 9013:2017, розроблено та виготовлено вимірювальний пристрій (рис. 4, а). Підпружинений щуп опускається до контакту з поверхнею різку за допомогою електромагнітного приводу. Переміщення щупа контролюється лазерним триангуляційним вимірювачем (рис. 4, б). Робота вимірювача ґрунтується на принципі оптичної триангуляції. Промінь напівпровідникового лазера 1 фокусується об'єктивом 2 на поверхні досліджуваної деталі 6. Розсіяне на деталі випромінювання об'єктивом 3 збирається на CMOS-лінійці 4. Переміщення об'єкта 6 - 6' спричиняє відповідне зміщення зображення. Процесор 5 обчислює відстань до точки поверхні різку відповідно до положення отриманої світлової плями на лінійці 4.

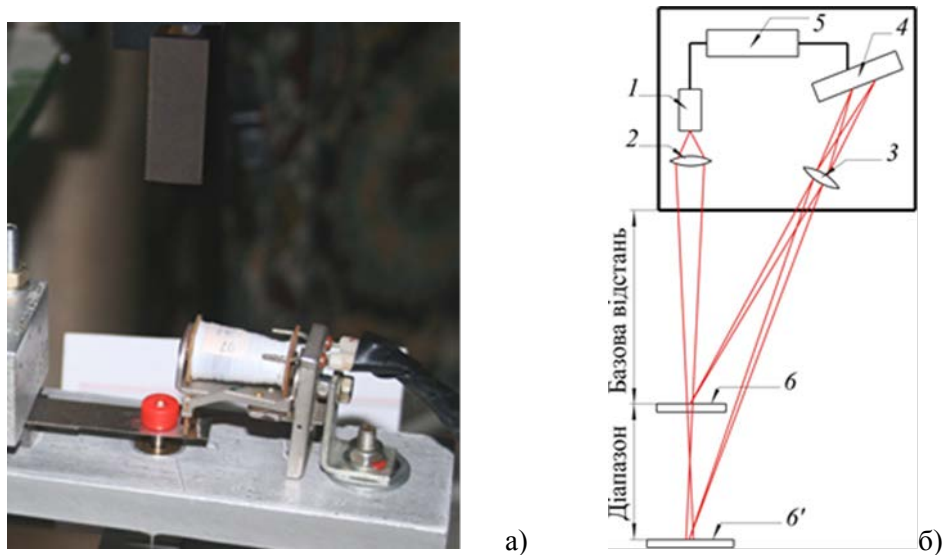


Рис. 4. Установка для визначення профілю бокової поверхні різку: а) пристрій для фіксації координат; б) схема лазерного триангуляційного вимірювача RIFTEK

Застосовуючи координатний стіл під керуванням комп'ютера, реєструвалися координати рельєфу поверхні різку. Отриманий профіль бокової поверхні різку наведено на рис. 5.

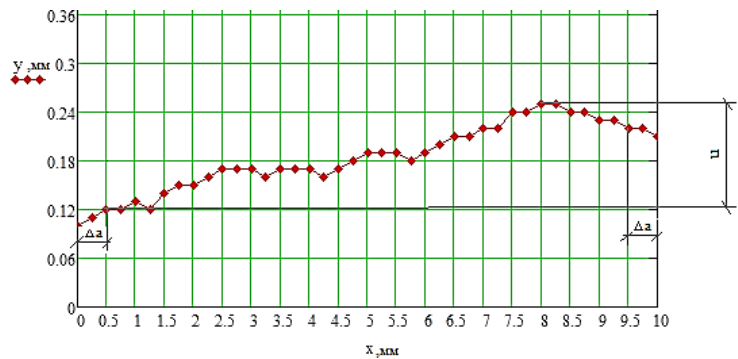


Рис. 5. Профіль бокової поверхні різку де:  $x$  – товщина деталі;  $\Delta a$  – зменшення товщини виміру;  $u$  – допуск перпендикулярності (згідно з вимогами ISO 9013:2017)

Верхня та нижня ширина різку в поперечному перетині поверхні обробки визначалися шляхом фотографування прорізаних пазів з використанням в якості еталону міри оптоволоконна. Отримані фотографії оброблялися в середовищі системи автоматизованого проектування (рис. 6).

В якості варійованого факторного простору було обрано 4 параметри: швидкість подачі  $F$ , мм/хв (cut speed); тиск асистуючого газу  $P$ , Бар (gas pressure); потужність лазерного променю  $W$ , Вт (peak power), положення фокусу відносно торця сопла  $S$ , мм (focus). Кожний фактор варіювався на трьох рівнях (нульовий, верхній, нижній). Відповідно до матриці планування експериментів було вирізано  $3^4=81$  зразків для досліджень і аналізу по кожній товщині (12 стандартних товщин). Зразки з наявністю ґрат відбраковувалися і не досліджувалися, так як ґрат є очевидною ознакою незадовільного результату досліду. При детальному дослідженні прийнятних зразків за наведеними методиками, визначалися режими з максимальними швидкостями різання за умови відповідності вимогам стандарту ISO 9013:2017 та замовників даного типу верстатів щодо шорсткості бокових поверхонь (за  $Ra$  та  $Rz$ ), верхньою та нижньою шириною різі (рис. 6), величиною отриманого допуску перпендикулярності поверхні різання (рис. 5).

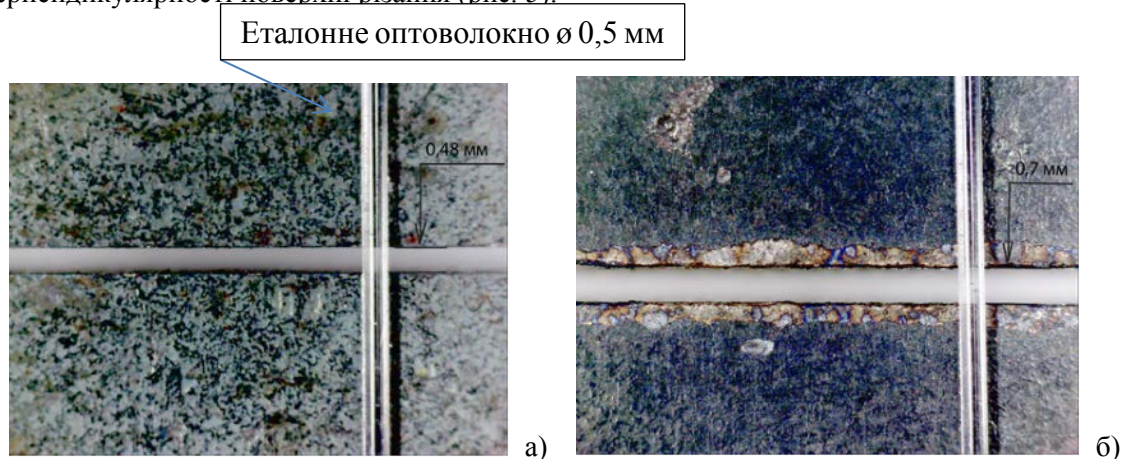
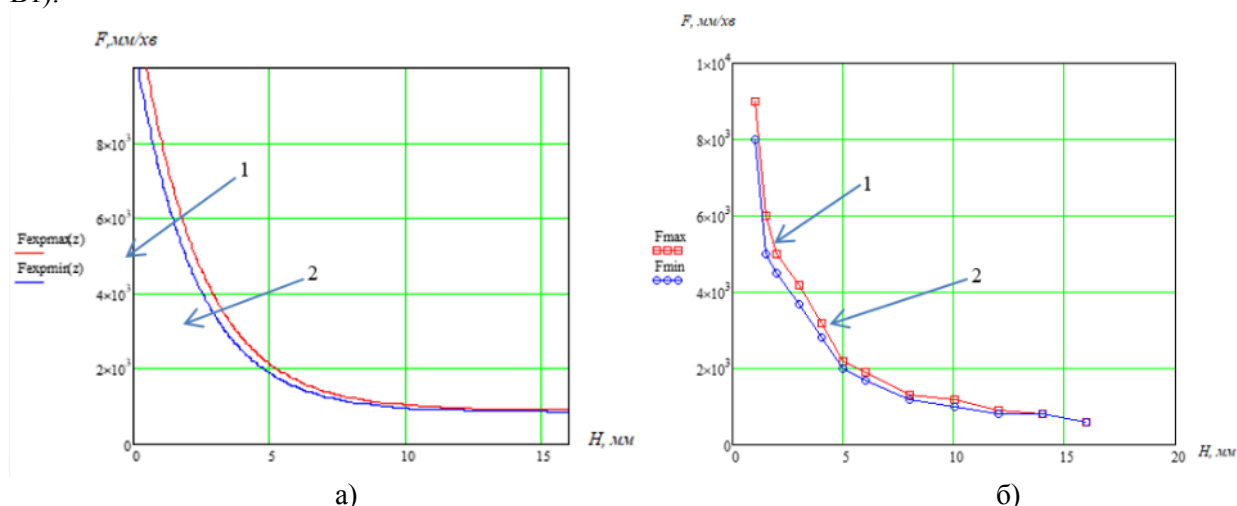


Рис. 6. Оброблені в середовищі системи автоматизованого проектування фотографії прорізаних пазів: а) верхній; б) нижній

#### Результати досліджень.

Основні експериментальні дані представлені на рис. 7. та рис. 8.

**Потужність.** Аналіз і узагальнення отриманих даних показало, що кращі результати як по швидкості різання так і за показниками якості отриманих поверхонь на потужностях лазерного променю  $W < 2000$  Вт, було отримано лише на товщині 1 мм. На решті товщин задовільні результати отримано лише за використання максимально можливої потужності лазерного променю ( $W = 2000$  Вт).



1 – низька (Low) швидкість різання за найкращих показників якості; 2) – висока (High) швидкість за незначного погіршення показників якості.

Рис. 7. Результати визначення залежності швидкості різання листової сталі ВСт3сп від товщини листа за умов отримання параметрів якості, що відповідають вимогам стандарту ISO 9013:2017: а) експериментальні дані; б) отримані в середовищі Mathcad апроксимуючі криві

**Швидкість різання.** В діапазоні товщин 1мм – 5мм спостерігається варіативність набору параметрів факторного простору, які дозволяють за незначного погіршення показників якості (в окремих випадках навіть з покращенням) отримувати більш високі швидкості різання (рис. 8). Так за товщини листа 1 мм діапазон прийнятних швидкостей становить 8000 мм/хв – 1000 мм/хв. Зі зростанням товщини металу за природнього падіння швидкості різання діапазон варіативності скорочується і за товщин більше 6 мм практично зникає. Тобто різниця між Low та High є незначною і в таблиці (рис 8) занесено лише High. По суті в рамках матриці планування експериментів в даному діапазоні товщин виявлено лише один узгоджений набір факторів які забезпечують швидкість різання за якої досягаються відповідні стандарту параметри якості поверхні різі. Спроби різати товщини більші 16 мм не дали жодного прийняттого результату досліду.

**Параметри шорсткості.** Дані показники суттєво впливають на те, потребує отримана поверхня додаткової обробки чи ні. На товщині 1 мм на пониженой швидкості різання (8000 мм/хв) отримано найкращі показники шорсткості ( $Rz(S)2,73...3,7$   $Ra(S)0,63...0,94$ ), що є близьким до показників чистової механічної обробки (точіння, фрезерування, та навіть окремі види шліфування). Зі зростанням товщини деталі спостерігається до певної міри коливальна але очевидна тенденція до погіршення показників якості отриманих поверхонь. Більш явною стає зміна шорсткості по висоті різі (зональність поверхні). Так на товщині 8 мм верх –  $Rz(V)15...18,6$  /  $Ra(V)2,43...3,0$ ; середина –  $Rz(S)26,3...29,3$  /  $Ra(S)4,72...5,13$ ; низ –  $Rz(N)=29,5...32,6$  /  $Ra(N)=5,0...5,32$ . На товщинах 12 мм, 14 мм, 16 мм спостерігається зміна плавного погіршення шорсткості на стрибкоподібне (по відношенню до товщини 10 мм на 60%-65%), що очевидно пов'язано з вичерпуванням енергетичних можливостей потужності лазерного променю  $W = 2000$  Вт. За такої потужності не підтримується необхідна швидкість горіння заліза по всій висоті різі, особливо в нижній частині. В результаті чого певна частина розплаву не встигає ні згоріти ні видалитися з пазу. Ці залишки застигаючи на бокових поверхнях різі суттєво погіршують їх якість. Спроба збільшення тиску подачі кисню тільки погіршує ситуацію. Таке рішення призводить до інтенсифікації горіння і плавлення лише у верхній частині різі. В цій зоні утворюється надмірна кількість рідкої фази, яка або застигає на нижній поверхні у вигляді ґрату або повністю заварює паз. В цілому всі результати по параметрам шорсткості наведені в таблицях представлених на рис. 8 відповідають вимогам 1-2 діапазонів ISO 9013:2017. В залежності від призначення деталей, що виготовляються за технологією лазерного різання вимоги до параметрів шорсткості можуть суттєво різнитися. Спираючись на відомі вимоги замовників даного типу верстатів отримані параметри шорсткості на товщинах до 10 мм практично на 100% задовольняють їх потреби. В окремих випадках на більших товщинах отримані деталі вимагають, як правило, додаткової механічної обробки і відповідних припусків на її виконання.

**Верхня та нижня ширина різі, величина відхилення поверхні різання від перпендикулярності (нахил).** Дані параметри безпосередньо впливають на точність отриманих деталей. Без їх врахування практично неможлива розробка керуючих програм. Як і варто було очікувати за використання максимальної потужності лазерного променю на ширину різі найбільший вплив мають положення фокусу, швидкість різання та товщина листа. На товщині різання 3 мм за рахунок збалансованого підбору параметрів вдалося отримати відхилення від перпендикулярності, що не перевищує 0,008 мм. В загальному, за деякої коливальності значень даних величин (особливо до товщини 4 мм) з ростом товщини збільшуються як верхня і нижня ширина різі так і відхилення від перпендикулярності. Будучи важливим чинником впливу на точність різання, величина ширини різі не регламентується ISO 9013:2017. За відхиленням від перпендикулярності отримані результати не перевищують вимог 1-2 діапазонів даного стандарту.

Для верифікації результатів було досліджено 20 зразків деталей вирізаних на 4 серійних верстатах моделі AFX-PRO-2000-1530-LD на рекомендованих режимах. Відхилення параметрів якості від табличних значень не перевищувало 5%.

#### **Висновки.**

1. Розроблені методики досліджень та проведена серія експериментів які дозволили вперше встановити діапазон збалансованих параметрів лазерного променю та лазерного процесу при різанні листової сталі ВСтЗсп стандартного ряду товщин випромінюванням оптоволоконного лазера потужністю 2000 Вт в середовищі кисню. Встановлені режими забезпечують високу продуктивність та кількісний контроль за параметрами якості різі, які відповідають вимогам стандарту ISO 9013:2017.

Товщина металу, мм	High/Low	Діаметр сопла, мм	Потужність, кВт	Положення фокусу відносно торця сопла	Тиск, бар	Швидкість подачі металу, мм/хв	Ширина різання (верх/низ), мм	Шорсткість поверхні, Rz/Ra	Відхилення від перпендикулярності, мм	
1	Low	1	1700	+2	3	8000	0,26/ 0,31	Rz(S)=2,73...3,7 Ra(S)=0,63...0,94	0,023	
								Rz(S)=3,35...5,35/ Ra(S)=0,64...0,95		0,033
								Rz(S)=5,5...6,69/ Ra(S)=1,2...1,4		
1,5	Low	1	2000	+4	3	5000	0,33/ 0,39	Rz(S)=7,7...12,7/ Ra(S)=0,92...2,24	0,018	
								Rz(S)=4,05...8,6/ Ra(S)=0,86...1,5		0,031
								Rz(S)=4,0...7,8/ Ra(S)=0,61...2,17		
2	Low	1	2000	+4	1	4500	0,43/ 0,51	Rz(S)=8,63...8,7/ Ra(S)=1,98...2	0,037	
								Rz(S)=4,15...6,24/ Ra(V)=0,8...1,28		0,028
								Rz(S)=4,8...7,0/ Ra(S)=1,08...1,13		
3	Low	1	2000	+3	0,8	3700	0,39/ 0,51	Rz(S)=5,4...8,7/ Ra(N)=1,08...1,72	0,055	
								Rz(S)=4,46...7,2/ Ra(V)=0,94...1,18		0,008
								Rz(S)=4,8...7,0/ Ra(S)=1,08...1,13		
4	High	1	2000	+5	1	2800	0,55/ 0,65	Rz(S)=7,8...12,2/ Ra(V)=0,94...1,18	0,047	
								Rz(S)=4,46...7,2/ Ra(V)=0,94...1,18		0,057
								Rz(S)=4,8...7,0/ Ra(S)=1,08...1,13		
5	Low	1	2000	+4	1	2000	0,52/ 0,61	Rz(S)=7,8...12,2/ Ra(S)=1,72...2,41	0,049	
								Rz(S)=8,0...9,4/ Ra(S)=1,72...2,69		0,049
								Rz(S)=7,9...12,6/ Ra(S)=1,47...1,98		

Товщина металу, мм	High/Low	Діаметр сопла, мм	Потужність, кВт	Положення фокусу відносно торця сопла	Тиск, бар	Швидкість подачі металу, мм/хв	Ширина різання (верх/низ), мм	Шорсткість поверхні, Rz/Ra	Відхилення від перпендикулярності, мм	
6	High	1,2	2000	+3	5	1800	0,48/ 0,61	Rz(N)=7,48...10,5/ Ra(N)=1,35...2,35	0,065	
								Rz(S)=10,3...11/ Ra(S)=1,89...1,9		0,068
								Rz(N)=7,48...10,5/ Ra(N)=1,35...2,35		
8	High	1,5	2000	+4	0,7	1300	0,48/ 0,7	Rz(V)=5,5...11,7/ Ra(V)=1,0...1,6	0,108	
								Rz(S)=6,7...9,5/ Ra(S)=1,4...1,7		0,13
								Rz(N)=7,5/ Ra(N)=1,7		
10	High	1,5	2000	+4	0,85	1000	0,53/ 0,81	Rz(V)=15...18,6/ Ra(V)=2,43...3,0	0,13	
								Rz(S)=26,3...29,3/ Ra(S)=4,72...5,13		0,108
								Rz(N)=29,5...32,6/ Ra(N)=5,0...5,32		

Товщина металу, мм	High/Low	Діаметр сопла, мм	Потужність, кВт	Положення фокусу відносно торця сопла	Тиск, бар	Швидкість подачі металу, мм/хв	Ширина різання (верх/низ), мм	Шорсткість поверхні, Rz/Ra	Відхилення від перпендикулярності, мм	
12	High	2,0	2000	+4	0,6	800	0,56/ 0,87	Rz(V)=42,8...51/ Ra(V)=7...11	0,135	
								Rz(S)=45,7...52,7/ Ra(S)=9,57...16,4		0,135
								Rz(N)=53,8...73/ Ra(N)=13,84...18,6		
14	High	2,0	2000	+5	0,65	800	0,56/ 0,84	Rz(V)=43,4...56/ Ra(V)=7...11	0,138	
								Rz(S)=49,4...70,9/ Ra(S)=8,52...15,6		0,138
								Rz(N)=51...61/ Ra(N)=13,84...19,85		
16	High	3,0	2000	+6	0,55	600	0,65/ 1,2	Rz(V)=40...47,1/ Ra(V)=7,98...8,97	0,26	
								Rz(S)=35,7...40,3/ Ra(S)=6,72...8,57		0,26
								Rz(N)=43,5...44,2/ Ra(N)=8,54...8,83		

Рис. 8. Технологічна карта параметрів різання сталі ВСтЗсп технологічної інструкції до верстатів моделі AFX-PRO-2000-1530-LD

© В.І. Осипенко, О.П. Плахотний, М.Р. Прусс, С.П. Середюк



2. Отримані результати покладені в основу розділу технологічної інструкції до серійних верстатів моделі AFX-PRO-2000-1530-LD. Проведена експериментальна верифікація підтвердила добру відтворюваність наданих режимів. Відхилення параметрів якості від табличних значень не перевищувало 5%.

3. Матеріали роботи можуть слугувати підґрунтям для трибологічних досліджень поверхонь, отриманих лазерним різанням з використанням в якості одного з вхідних параметрів кривої коефіцієнта стійкості Еббота-Файрстоуна.

#### **Список використаних джерел:**

1. Badoniya P (2018) CO<sub>2</sub> laser cutting of different materials. A review. *Int Res J Eng Technol* (February):1–12 [Online]. Avail-able: <http://www.irjet.net>. Accessed 22 Oct 2022.

2. Liu Y, Zhang S, Zhao Y, Ren Z (2022) Experiments on the kerf quality characteristic of mild steel while cutting with a high-power fiber laser. *Opt Laser Technol* 154(June):108332. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108332>.

3. Naresh, Khatak P (2022) Laser cutting technique: a literature review. *Mater Today Proc* 56(5 SI):2484–2489. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.250>.

4. Steen W, Mazumder J (2010) *Laser Cutting, Drilling and Piercing*. In: *Laser Material Processing*. Springer, London. [https://doi.org/10.1007/978-1-84996-062-5\\_4](https://doi.org/10.1007/978-1-84996-062-5_4).

5. Bäuerle D (ed) (2013) *Laser Processing and Diagnostics: Proceedings of an International Conference, University of Linz, Austria, Vol 39*. Springer Science & Business Media, 15–19.

6. Dutta Majumdar J, Manna I (2003) Laser processing of materials. *Sadhana* 28:495–562. <https://doi.org/10.1007/BF02706446>.

7. Muhammad Alsaadawy, Montasser Dewidar, Ahmed Said, Ibrahem Maher, Taher A. Shehabeldeen (2024) A comprehensive review of studying the influence of laser cutting parameters on surface and kerf quality of metals. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2024) 130:1039–1074. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12768-1>.

8. V. I. Osypenko, O. P. Plakhotnyi, S. P. Serediuk, M. R. Pruss, O. V. Timchenko, (2023) The influence patterns of nozzle design and technological parameters of gas-assisted laser cutting on the stagnant pressure of assisting gas. *Bulletin of Cherkasy State Technological University*, 3/2023, 156-167. <http://vtn.chdtu.edu.ua/article/view/288972>