

УДК 004.383 (043)

[0000-0002-4066-8182] Д. А. Гардер

Черкаський державний технологічний університет
б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ПАРАМЕТРИЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМІВ АВТОМАТИЗОВАНОГО ЛАЗЕРНОГО ЗВАРЮВАННЯ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

В роботі запропоновано підвищення ефективності інформаційної технології параметричної оптимізації режимів автоматизованого лазерного зварювання тонкостінних конструкцій зі сталі в умовах невизначеності шляхом розробки інформаційної спеціалізованої бази даних за результатами експериментальних параметричних досліджень, створення інформаційної технології аналітичного опису функціональних залежностей між шириною зварного шва, швидкістю переміщення лазерного випромінювання щодо оброблюваної заготовки і потужністю лазерного випромінювання. Запропоновано принцип прийняття рішення параметричної оптимізації в умовах невизначеності на базі розробленого графоаналітичного методу. Метод використовує графічне зображення сплайн-функцій, побудованих в єдиному квадранті із загальною абсцисою, значення якої відповідає величинам зварного шва. Координати точки перетину функціональних залежностей визначають відповідні оптимальні параметри режиму автоматизованого лазерного зварювання тонкостінних конструкцій зі сталі. Візуалізація принципу параметричної оптимізації в умовах невизначеності прискорює процес технологічної підготовки виробництва, що сприяє підвищенню продуктивності підприємства.

Ключові слова: лазерне зварювання тонкостінних конструкцій, умови невизначеності, графоаналітичний метод, параметрична оптимізація.

Вступ. Головною рисою сучасного етапу науково-технічного прогресу є застосування інформаційних технологій, які ґрунтуються на останніх наукових досягненнях.

Розвиток таких пріоритетних галузей промисловості, як: оборонна, ракетно-космічна, суднобудування, приладобудування, медична, авіаційна та інші, обумовлює постійно зростаючу потребу в автоматизованих лазерних технологіях зварювання та новому обладнанні. Їх застосування забезпечує ресурсо-, енергозбереження, екологічність при нероз'ємному з'єднанні як великогабаритних, так і мініатюрних тонкостінних конструкцій. Проблема полягає в тому, що на якість нероз'ємного з'єднання тонкостінних конструкцій при виконанні операції автоматизованого лазерного зварювання (АЛЗ) в режимі реального часу впливають багато факторів: властивість матеріалів з'єднаних конструкцій, стан навколишнього середовища, технологічного обладнання, зварювального, вимірювального інструментів та ін. Отримання якісного з'єднання вимагає попереднього дослідження перелічених факторів, на це витрачається багато часу, що економічно не вигідно. Особливо це відчутно при відсутності серій-

ного випуску продукції. У такому разі частіше доводиться приймати рішення по визначенню оптимальних параметрів режимів зварювання в умовах невизначеності, що призводить або до зниження якості, або до збільшення вартості продукції через використання багатьох енергочасових, людських та матеріальних витрат на попереднє дослідження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останнім часом з'явилося багато публікацій, в яких наведено приклади створення лазерних комплексів та лазерного інструменту [1, 22, 23]. В роботах [2-3] представлено компактні конструкції лазерних мобільних установок для зварювання листів з конструкційної та нержавіючої сталей і титану. Лазерним пучком управляє мікроконтролер. При зміні швидкості переміщення виробляється коректування потужності лазерного пучка, що сприяє одержанню зварного з'єднання необхідної якості. Ці конструкції характеризуються простотою керування процесом лазерного зварювання й економічністю, але робочий інструмент переміщується вручну.

Переносні апарати LHS-1 [4], LHS-2 [5], призначені для лазерного зварювання коротких стикових з'єднань і таврових з'єднань,

дають операторові можливість робити захоплення й подальше зварювання металоконструкції в машино- і суднобудуванні. Параметри режиму зварювання задаються спеціальною програмою. У зварювальному учбово-дослідницькому центрі (Галле, Німеччина) розроблено два варіанти оригінального переносного устаткування для механізованого лазерного зварювання [6]. Зварювання проводиться в захисному газі, але позиціонування апаратів проводиться вручну. Такі компактні конструкції лазерних установок відзначаються простотою керування процесом і застосовуються, в першу чергу, на малих і середніх підприємствах.

В роботах [7-9] велика увага приділяється одному з напрямів розвитку лазерного зварювання, а саме – автоматизованому лазерному зварюванню (АЛЗ). Заслужують на увагу дослідження, спрямовані на визначення методів зварювання [10], [16], що забезпечують легкість управління конфігурацією лазерного випромінювання, за допомогою якої формуються міцна і високоякісна мікроструктура зварного шва та біляшовне оточення для різних матеріалів. Проте принцип прийняття рішення в умовах невизначеності при оптимізації режимів АЛЗ залишається трудомістким, і тому проблематика параметричної оптимізації є першочерговою науковою проблемною задачею.

Отже, наявна інформаційна технологія щодо розробки принципу підтримки прийняття рішення в умовах невизначеності для параметричної оптимізації режимів автоматизованого лазерного зварювання тонкостінних конструкцій вирішена не повною мірою, що підтверджує актуальність теми.

Метою роботи є підвищення ефективності інформаційної технології параметричної оптимізації режимів автоматизованого лазерного зварювання в умовах невизначеності шляхом розробки інформаційної спеціалізованої бази даних, за результатами експериментальних досліджень та графоаналітичного методу визначення найкращих значень потужності лазерного випромінювання та швидкості його переміщення і значення ширини зварного шва.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Створити інформаційну спеціалізовану базу даних відношень ширини зварного шва, швидкості та потужності режимів

зварювання тонкостінних конструкцій за результатами експерименту.

2. Встановити функціональні залежності між шириною зварного шва, швидкістю і потужністю режимів зварювання на основі апроксимації сплайн-функцій.

3. Розробити графоаналітичний метод визначення найкращих параметрів режимів зварювання тонкостінних конструкцій.

Основний матеріал. Дослідження впливу швидкості зварювання лазерним випромінюванням і потужності лазерного випромінювання на ширину зварного шва проводилися за методикою, яка містить опис і технології в роботах [9, 11, 12, 14, 17-21].

Устаткування – трикоординатний лазерний комплекс «АРМА-100М [13]»; інструмент – ітербієвий волоконний одномодовий лазер типу ЛС-01-Б потужністю випромінювання 100 Вт, діаметром пучка лазерного випромінювання 10 мкм; при зварюванні зона плавлення захищалася інертними газами: зверху гелієм, а знизу аргонном; вимірювальний інструмент – мікроскоп ММІ-2.

Об'єктом дослідження є зразки стрічок сталей:

№ 1 – сталь 12Х18Н10Т, товщина $\delta = 0,15$ мм;

№ 2 – сталь 1.4541, товщина $\delta = 0,15$ мм;

№ 3 – сталь 1.4541, товщина $\delta = 0,2$ мм.

За результатами дослідження впливу швидкості (V) і потужності (P) лазерного випромінювання на ширину зварного шва (b) створено інформаційну базу даних відношень ширини зварного шва, швидкості та потужності режиму зварювання тонкостінних конструкцій.

Приклади реляційних зображень даних показано на трьох зразках і наведено у таблиці 1 $b(V)$ при $P_i = \text{const}$; у таблиці 2 $b(P)$ при $V_i = \text{const}$ та різних типах сталі. Першими атрибутами у таблицях 1 і 2 є номер зразків №, тип сталі, товщина стрічки δ , величина потужності випромінювання P (у таблиці 1) і величина швидкості зварювання (у таблиці 2), їх відповідні домени мають кортежі швидкості зварювання (або потужності випромінювання) і відповідні значення ширини шва.

Аналіз результатів дослідження (таблиця 1) показав, як впливає значення швидкості лазерного зварювання при постійному значенні потужності лазерного випромінювання на ширину шва зварного з'єднання, тобто b зменшується при збільшенні V .

Таблиця 1 – Реляційна модель експериментальних даних (схема відношень швидкості лазерного зварювання при постійному значенні потужності лазерного випромінювання та ширини шва зварного з'єднання)

Зразок № 1, сталь 12X18Н10, $\delta=0,15$ мм при $P_n = 65$ Вт	швидкість зварювання, $V \cdot 10^{-2}$ м/с	0,83	1,0	1,08	1,33	1,5	1,67	1,83	2	2,16	2,33	2,5
	ширина шва b , мм	1,37	1,21	1,09	0,92	0,77	0,7	0,64	0,57	0,55	0,49	0,46
Зразок № 2, сталь 1.4541, $\delta=0,15$ мм при $P_n = 55$ Вт	швидкість зварювання, $V \cdot 10^{-2}$ м/с	0,8	1,1	1,16	1,33	1,51	1,66	1,81	2	-	-	-
	ширина шва b , мм	0,88	0,73	0,69	0,64	0,59	0,52	0,5	0,45	-	-	-
Зразок № 3, сталь 1.4541, $\delta=0,2$ мм при $P_n = 60$ Вт	швидкість зварювання, $V \cdot 10^{-2}$ м/с	0,8	1,1	1,16	1,33	1,51	1,66	1,81	2	-	-	-
	ширина шва b , мм	0,75	0,68	0,65	0,625	0,61	0,58	0,54	0,49	-	-	-

Таблиця 2 – Реляційна модель експериментальних даних (схема відношень потужності лазерного випромінювання при постійному значенні швидкості лазерного зварювання та ширини шва зварного з'єднання)

Зразок № 1, сталь 12X18Н10Т, $\delta=0,15$ мм при швидкості зварювання $V=1,5 \cdot 10^{-2}$ м/с	Потужність лазерного випромінювання P , Вт	30	40	50	60	70	-
	Ширина шва b , мм	0,1	0,48	0,82	1,12	1,3	-
Зразок № 2, сталь 1.4541, $\delta=0,15$ мм при швидкості зварювання $V=0,8 \cdot 10^{-2}$ м/с	Потужність лазерного випромінювання P , Вт	50	60	70	80	90	-
	Ширина шва b , мм	0,55	0,74	0,75	0,76	0,77	-
Зразок № 3, сталь 1.4541, $\delta=0,2$ мм при швидкості зварювання $V=0,8 \cdot 10^{-2}$ м/с	Потужність лазерного випромінювання P , Вт	50	60	70	80	90	100
	Ширина шва b , мм	0,45	0,57	0,575	0,58	0,585	0,6

Аналіз результатів дослідження (таблиця 2) показав, як впливає значення потужності лазерного випромінювання при постійному значенні швидкості лазерного зварювання на ширину шва зварного з'єднання, а саме: b збільшується при збільшенні P .

Аналіз розглянутих вище схем відношень підтвердив необхідність параметричної оптимізації через суперечність впливу на ширину зварного шва значень параметрів V і P .

Для розв'язання цієї проблемної задачі пропонується графоаналітичний метод, який ґрунтується на використанні функціональних залежностей φ_1 , φ_2 між шириною зварного

шва, швидкістю і потужністю режиму зварювання:

$$b_1 = \varphi_1(V_i, P_j); \quad (1)$$

$$b_2 = \varphi_2(P_i, V_j), \quad (2)$$

де індекс « i » показує належність до поточного значення відповідного параметра або V_i , або P_i ; індекс « j » належить параметру значення, що дорівнює відповідній незмінній величині:

$$\text{або } P_j \rightarrow \text{const, або } V_j \rightarrow \text{const.}$$

Відомо, що математичні моделі, які побудовані за результатами експериментальних

досліджень, не призначені для фізичної інтерпретації, оскільки їх структура не пов'язана з якими-небудь невизначеними фізичними закономірностями [15]. Великою перевагою експериментальних методів є простота.

Математична модель апроксимуючих сплайн-функцій ширини зварного шва для зразка № 1, що проведена за таких умов:

- для моделі (1) діапазон зміни швидкості V становить від $0,75 \cdot 10^{-2}$ м/с до $2 \cdot 10^{-2}$ м/с при постійному значенні $P_1 = 65$ Вт;

– для моделі (2) діапазон зміни потужності P становить

- від 49 Вт до 99 Вт при постійному значенні $V_1 = 1,5 \cdot 10^{-2}$ м/с, що мають вигляд відповідно:

$$b_1(V) = -0,1138 V^3 + 0,8768 V^2 - 2,4432 V + 2,8669 \quad (3)$$

$$b_1(P) = -0,000007 P^3 + 0,0007 P^2 + 0,0141 P - 0,7589 \quad (4)$$

На основі математичних моделей (3), (4) апроксимуючої сплайн-функції для залежностей $b_1(V)$ і $b_1(P)$ побудовано знакові моделі для зразка № 1, які зображено на рисунках 1 і 2 відповідно.

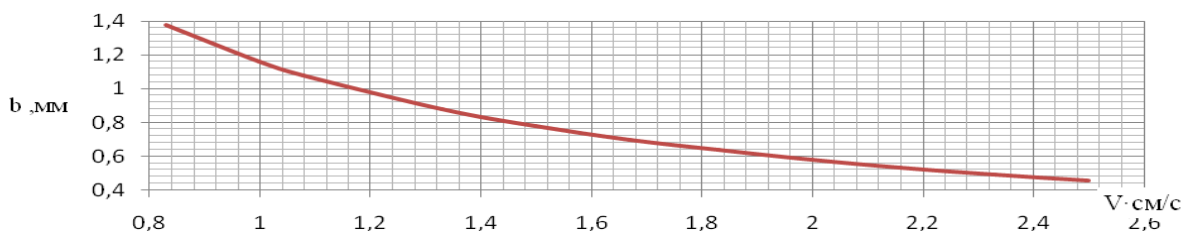


Рисунок 1 – Залежність геометричних розмірів шовного з'єднання b від швидкості V переміщення лазерного випромінювання відносно заготовки, яка обробляється, для зразка № 1

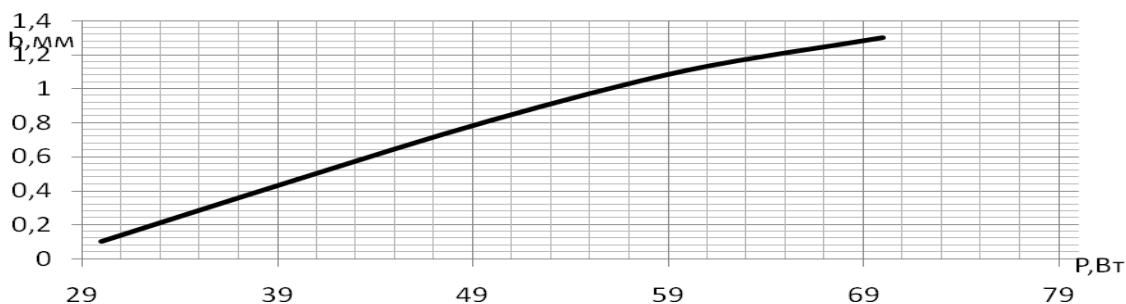


Рисунок 2 – Залежність геометричних розмірів шовного з'єднання b від потужності P лазерного випромінювання для зразка № 1

Математична модель апроксимуючих сплайн-функцій ширини зварного шва для зразка № 2 проведена за таких умов:

- для моделі (1) діапазон зміни швидкості V становить від $0,75 \cdot 10^{-2}$ м/с до $2 \cdot 10^{-2}$ м/с при постійному значенні $P_2 = 55$ Вт;
- для моделі (2) діапазон зміни потужності P становить від 49 Вт до 99 Вт при постійному значенні $V_2 = 0,8 \cdot 10^{-2}$ м/с,

що мають вигляд відповідно:

$$b_2(V) = -0,0805 V^3 + 0,4831 V^2 - 1,2087 V + 1,5782 \quad (5)$$

$$b_2(P) = -0,000015 P^3 - 0,0034 P^2 + 0,256 P - 5,6046 \quad (6)$$

На основі математичних моделей апроксимуючої сплайн-функції для залежностей $b_2(V)$ і $b_2(P)$ побудовано знакові моделі для зразка № 2, які зображено на рисунках 3 і 4 відповідно.

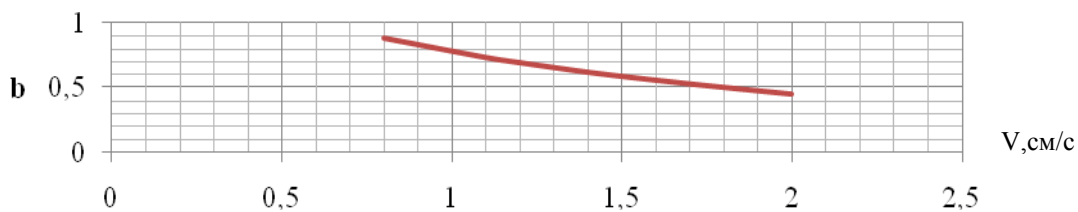


Рисунок 3 – Залежність геометричних розмірів шовного з'єднання b від швидкості переміщення лазерного випромінювання відносно заготовки, що обробляється, для зразка № 2

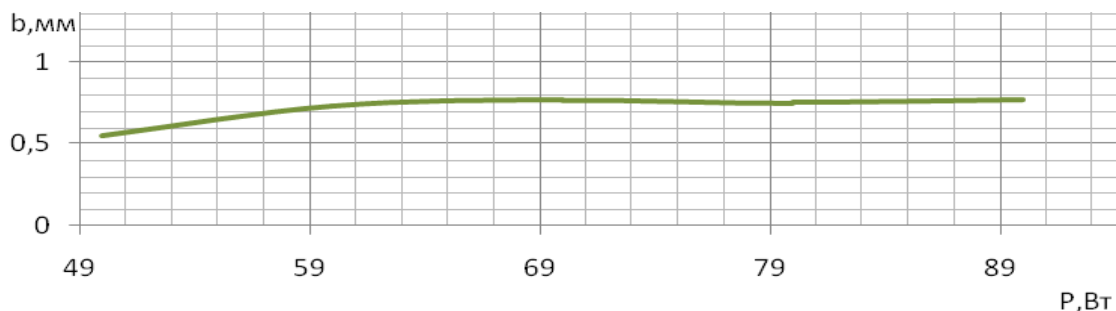


Рисунок 4 – Залежність геометричних розмірів шовного з'єднання b від потужності лазерного випромінювання для зразка № 2

Математична модель апроксимуючих сплайн-функцій ширини зварного шва b від швидкості лазерного зварювання і потужності лазерного випромінювання при товщині $\delta = 0,2$ мм для зразка № 3 проведена за таких умов:

- для моделі (1) діапазон зміни швидкості V становить від $0,75 \cdot 10^{-2}$ м/с до $2 \cdot 10^{-2}$ м/с при постійному значенні $P_3 = 60$ Вт;
- для моделі (2) діапазон зміни потужності P становить

від 49 Вт до 99 Вт

при постійному значенні $V_3 = 0,8 \cdot 10^{-2}$ м/с, що мають вигляд відповідно:

$$b_3(V) = -0,1895 V^3 + 0,7943 V^2 - 1,2602 V + 1,3475 \quad (7)$$

$$b_3(P) = 0,000006 P^3 - 0,0014 P^2 + 0,1111 P - 2,3337. \quad (8)$$

На основі математичних моделей апроксимуючої сплайн-функції для залежностей $b_3(V)$ і $b_3(P)$ побудовано знакові моделі для експерименту № 3, які зображено на рисунках 5 і 6 відповідно.

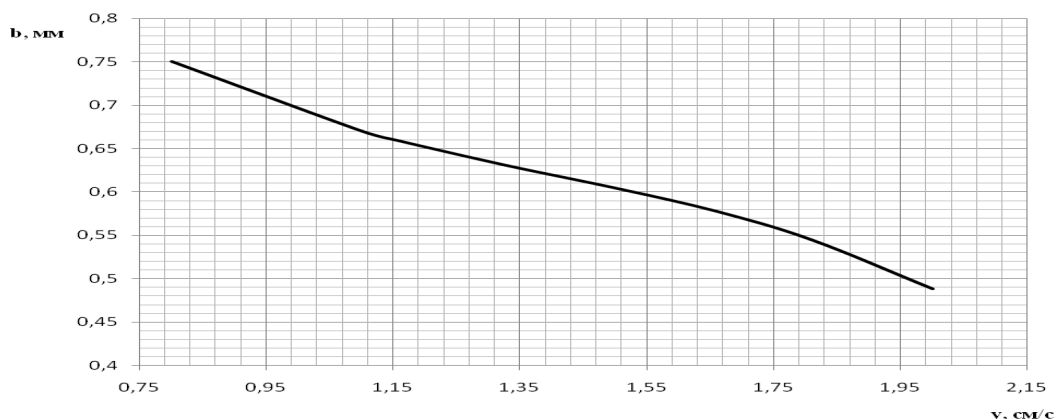


Рисунок 5 – Залежність геометричних розмірів шовного з'єднання b від швидкості переміщення лазерного випромінювання відносно заготовки, що обробляється, для зразка № 3

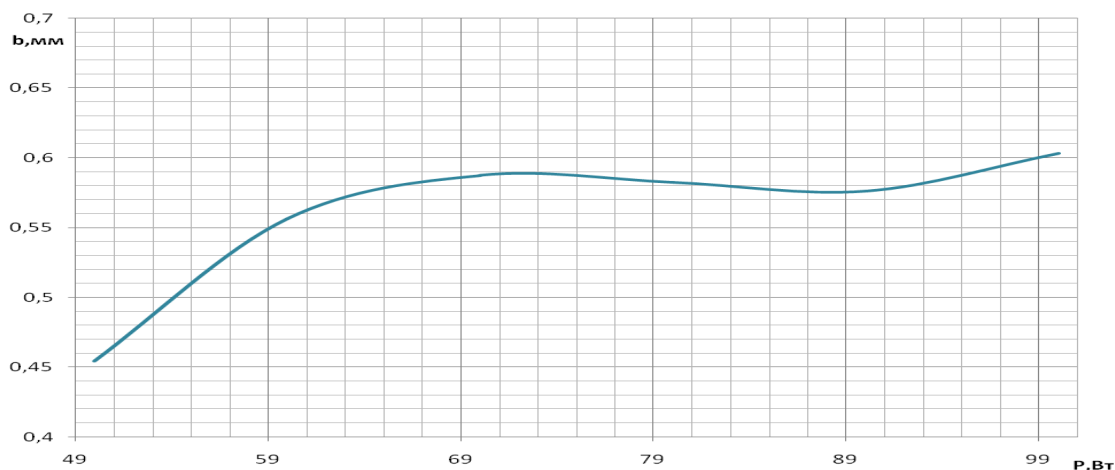


Рисунок 6 – Залежність геометричних розмірів шовного з'єднання b від потужності лазерного випромінювання для зразка № 3

У роботі [12] запропоновано вибір технологічних параметрів процесу зварювання на основі визначення максимального значення ККД. Водночас ця інформаційна технологія передбачає наступні процедури: визначаються оптимальні технологічні параметри лазерного зварювання тонкостінних конструкцій за запропонованим значенням ширини зварного шва $b_{\text{зап}}$; на основі якого експериментальним методом визначається значення швидкості V лазерного зварювання при потужності лазерного випромінювання $P = \text{const}$; проводиться обчислювання значення V_{max} , при якому забезпечується прямокутна геометрія шва; визначається експериментальна залежність $b(P)$ при $V = V_{\text{max}} = \text{const}$; знаходиться точка перегину, при якій залишається майже постійним значення шва b при подальшому збільшенні потужності. Однак відповідні значення потужності, швидкості процесу зварювання та ширини зварного шва вибираються дослідником. Недоліками цього методу є суб'єктивність при прийнятті рішення щодо значень $b_{\text{зап}}$ і велика тривалість перелічених процедур. Тому пропонується графоаналітичний метод визначення оптимальних технологічних параметрів, який створений, використовуючи розроблену інформаційну спеціалізовану базу даних. Графоаналітичний метод визначення одночасно оптимальних значень V , P і b базу-

ється на використанні теорії інформаційної технології при створенні інформаційної спеціалізованої бази даних за результатами експериментального дослідження, на принципі параметричної оптимізації та принципі прийняття рішень в умовах невизначеності, що ґрунтуються на результатах сформованої схеми відношень швидкості лазерного зварювання і ширини зварного шва при постійному значенні потужності лазерного випромінювання та схеми відношень потужності лазерного випромінювання і ширини зварного шва при постійному значенні швидкості лазерного зварювання; синтезу знакових моделей відповідних залежностей $V(b)$ і $P(b)$, побудованих в єдиному квадранті, де єдиною загальною абсцисою є значення зварного шва b . Приклади реалізації цього методу наведено на рисунках 7, 8, 9, де зображено залежності $V(b)$ і $P(b)$ для зразків № 1, № 2, № 3 відповідно, де загальною абсцисою є значення b .

Обговорення результатів. Аналіз інформаційних зображень, представлених на рисунках 7, 8, 9, показав, що процедура визначення відповідних параметрів режиму лазерного зварювання отримана наступним чином: з точок перетину залежностей $V_i(b)$ та $P_i(b)$ опускаються перпендикуляри до перетину з відповідними осями V , P , b , значення цих точок відповідають таким параметрам:

$$P_1 = 51,1 \text{ Вт}; V_1 = 1,45 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}; b_1 = 0,83 \text{ мм для зразка № 1};$$

$$P_2 = 58,3 \text{ Вт}; V_2 = 1,67 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}; b_2 = 0,53 \text{ мм для зразка № 2};$$

$$P_3 = 53,1 \text{ Вт}; V_3 = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}; b_3 = 0,6 \text{ мм для зразка № 3}.$$

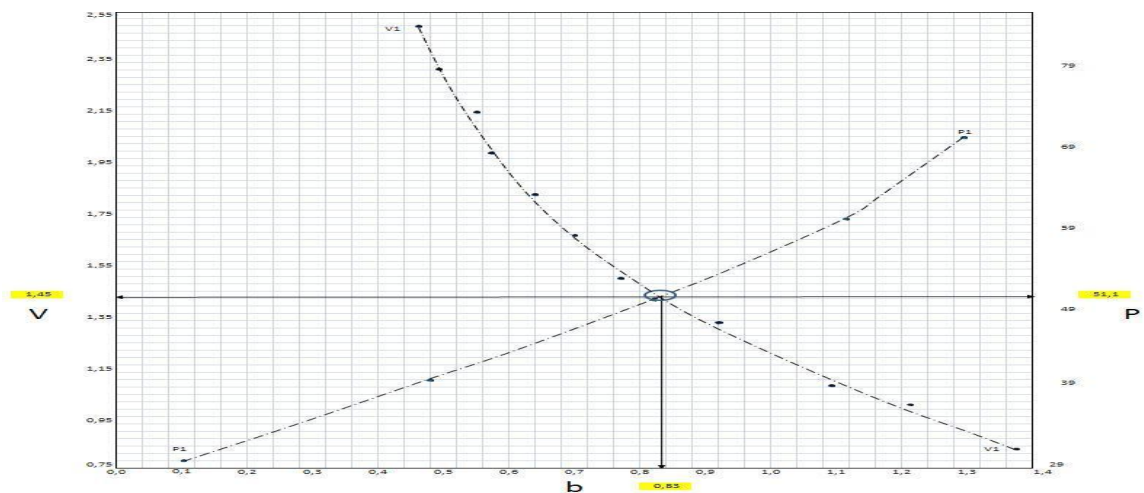


Рисунок 7 – Графіки визначення оптимальних параметрів процесу АЛЗ тонкостінних конструкцій зі сталі 12Х18Н10Т для зразка № 1

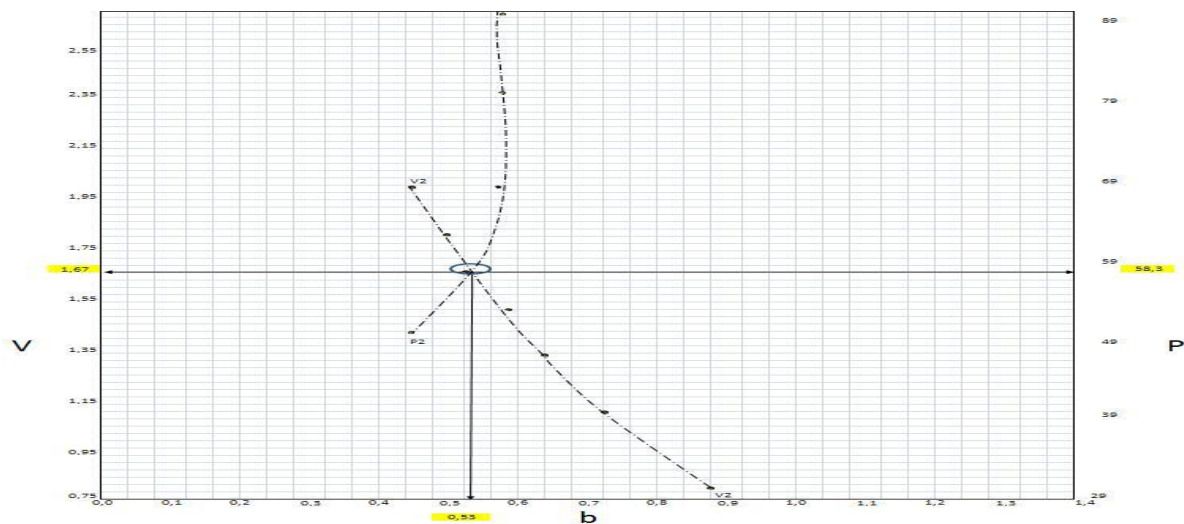


Рисунок 8 – Графіки визначення оптимальних параметрів процесу лазерного зварювання тонкостінних конструкцій зі сталі 1,4541 для зразка № 2

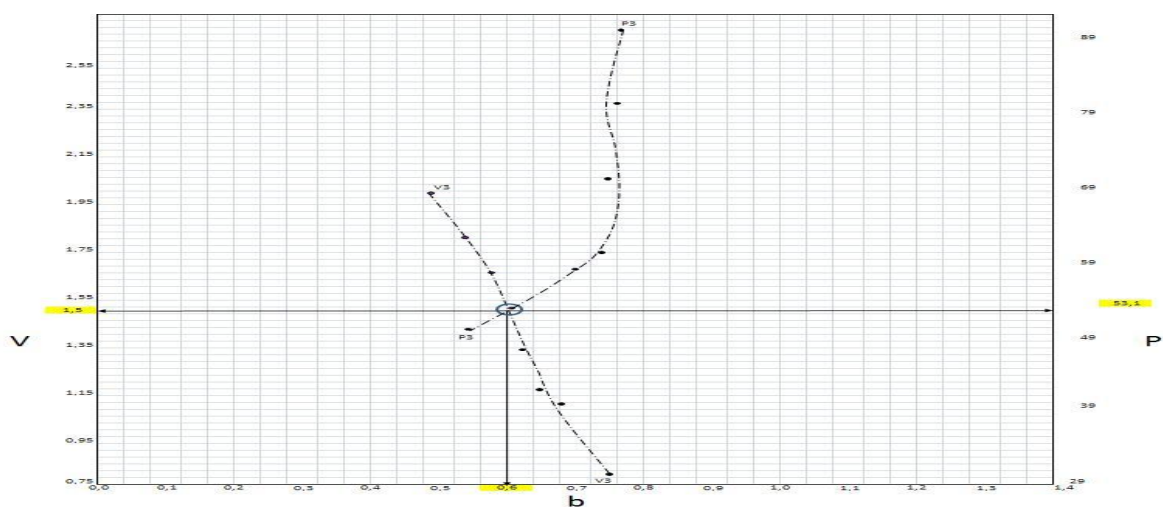


Рисунок 9 – Графіки визначення оптимальних параметрів процесу лазерного зварювання тонкостінних конструкцій зі сталі 1,4541 для зразка № 3

Порівняльний аналіз інформаційних технологій, що використовуються авторами в роботах прототипів, які розглянуті вище, показав, що великою перевагою запропонованого графоаналітичного методу щодо визначення найкращих параметрів режимів автоматизованого лазерного зварювання є простота і відсутність суб'єктивності при визначенні значення b [11, 12]. Крім того, встановлені функціональні залежності між шириною зварного шва, швидкістю і потужністю режимів зварювання на основі апроксимації сплайн-функцій дають можливість прогнозувати значення параметрів V та P при забезпеченні затребуваної геометрії b замовником виробу.

Висновки. У роботі сформульовано, досліджено та вирішено актуальну науково-технічну проблемну задачу підвищення ефективності інформаційної технології параметричної оптимізації режимів автоматизованого лазерного зварювання (АЛЗ) в умовах невизначеності шляхом: розробки інформаційної спеціалізованої бази даних за результатами експериментальних досліджень; створення інформаційної технології аналітичного опису функціональних залежностей між шириною зварного шва і швидкістю та потужністю режимів АЛЗ; прийняття рішення параметричної оптимізації в умовах невизначеності на базі розробленого графоаналітичного методу.

При виконанні роботи отримано нові наукові результати:

1. Розроблено інформаційну спеціалізовану базу даних у вигляді реляційної моделі за результатами експериментальних досліджень. Структуровані інформаційні дані зберігаються, обробляються та передаються для управління процесом автоматизованого лазерного зварювання тонкостінних конструкцій.

Відмітними особливостями є простота і доступність для розуміння користувачем, що зменшує час на підготовчому технологічному етапі.

2. Створено інформаційну технологію аналітичного опису функціональної залежності між шириною зварного шва, швидкістю і потужністю режимів АЛЗ на основі апроксимації сплайн-функціями. Відмітною особливістю запропонованих сплайн-функцій є можливість отримувати оптимальні сплайн-наближення з незакріпленими вузлами при використуванні методу найменших квадратів. Математичні моделі сплайн-функцій, порівняно з наявними інформаційними технологіями, що зберігають інформацію у вигляді двовимірних таблиць, зменшують об'єм пам'яті майже на 40 %, а також сприяють автоматизації обчислювальних процедур, що зменшує час на підготовку параметрів режимів АЛЗ.

3. На базі створеної інформаційної технології аналітичного опису функціональної залежності між основними параметрами режиму АЛЗ та шириною зварного шва розроблено графоаналітичний метод, який дає можливість визначити найкращі параметри режимів АЛЗ сталених тонкостінних конструкцій в умовах невизначеності. Візуалізація результатів забезпечує прискорення прийому інформації людиною майже на два порядки порівняно з іншими методами. Особливість методу полягає в отриманні значення абсцис, які відповідають конкретному значенню ординати, і навпаки. Це зменшує час підготовки відповідної інформації параметричної оптимізації в умовах невизначеності.

Отже, ефективність запропонованої інформаційної технології для параметричної оптимізації режимів автоматизованого лазерного зварювання в умовах невизначеності забезпечується сукупністю отриманих результатів, що перелічено вище, водночас великими перевагами цієї інформаційної технології порівняно з наявними прототипами є простота, легкість освоєння, що забезпечує значне зменшення енергочасових та матеріальних витрат на етапі технологічної підготовки для виготовлення виробу і, як наслідок, зменшується його вартість. Крім того, розширюється наявна інформаційна бібліотека бази знань для фахівців відповідного підприємства, що сприяє підвищенню його продуктивності та якості виробів.

Список використаних джерел

- [1] В. Н. Бернадский, В. Д. Шелягин, и О. К. Маковецкая, "Современный рынок лазерной техники для сварки и обработки материалов", *Автоматическая сварка*, № 10, 2007; "Мобильный аппарат для лазерной сварки", *Ibid.*, № 4, с. 193-194, 2000.
- [2] H. Exner, J. Drechsel, S. Klotzer, und V. Neumann, "Handgeführtes Fugen: Laser-Bearbeitungskopf für mobiles Laserschweißen", *Laser-Prax*, № 3, S. 14-15, 1999; Bd. 1, S. 145-159, 2001.
- [3] S. Keitel, "Manuelles Laserstrahlschweipen-Entwicklungs-prospektiven und

- Standder Anwendung", *Hochleistungs-fuegeverfahren-7 Inter. Aachener Schweiptchnik Kollo-gium*, Aachener, Dentchland, 3-4 Mai, 2001.
- [4] "Laserstrahl "Handschweissgerät" LHSG-1", *Techn.-inf. Halle: Berichte-SLV*, 2000.
- [5] "Laserstrahl "Handschweissgerät" LHSG-2", *Techn.-inf. Halle: Berichte-SLV*, 2000.
- [6] S. Celen, S. Karadeniz, and H. Ozden, "Effect of laser welding parameters on fusion zone morphological, mechanical and microstructural characteristics of AISI 304 stainless steel", *Materialwissenschaft und Werkstoff-technik*, № 39, 2008.
- [7] G. Daurelio, F. Memola Capece Minutolo, F. Curcio, and F. Caiazzo, "On the welding of austenitic/ferritic stainless steels by an High Power Diode Laser", *Proc. AMME'2003*, vol. 12, 7-10, pp. 187-190, Dec. 2003.
- [8] A. Nobuyuki, F. Yoshinori, I. Takashi, and T. Masahiro, "Micro welding of thin stainless steel foil with a direct diode laser", *Transactions of JWRI*, vol. 34, no. 1, pp. 19-23, 2005.
- [9] А. Г. Лукашенко, Т. В. Мельниченко, и Д. А. Лукашенко, "Лазерная сварка тонколистовой нержавеющей стали модулированным излучением", *Автоматическая сварка*, № 4, с. 19-23, 2012.
- [10] В. Д. Шелягин, А. Г. Лукашенко, Д. А. Лукашенко, В. А. Лукашенко, та В. Ю. Хаскин, "Спосіб лазерного зварювання з широтно-імпульсною модуляцією випромінювання", МПК (2014.01) В 23К 26/2: пат. на винахід 109328 С2 Україна, № а 2013 14855, заявл. Груд. 18, 2013, опубл. Серп. 10, 2015, Бюл. № 15.
- [11] Д. А. Лукашенко, А. Г. Лукашенко, И. А. Зубко, Р. Е. Юпин, и В. М. Лукашенко, "Оптимальный метод определения параметров режима лазерной сварки тонкостенных конструкций", *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, № 6/5 (54), с. 48-51, 2011.
- [12] В. Д. Шелягин, А. Г. Лукашенко, Д. А. Лукашенко, А. В. Бернацкий, В. П. Гаращук, и В. И. Луценко, "Лазерная сварка тонколистовой нержавеющей стали", *Автоматическая сварка*, № 4, с. 45-49, 2011.
- [13] А. Г. Лукашенко, В. Д. Шелягин, та В. М. Лукашенко, "Лазерна технологічна установка АРМА-100М", *Каталог сучасних наукових розробок та послуг ЧДТУ*. Черкаси: ЧДТУ, 2011.
- [14] В. Д. Шелягин, Д. А. Лукашенко, В. Ю. Хаскин, А. Г. Лукашенко, А. В. Сиора, и А. В. Бернацкий, "Сварка тонколистовой нержавеющей стали волоконным лазером", *Вестник ДНУ. Ракетно-космическая техника*, т. 19, № 4, с. 121-129, 2011.
- [15] П. М. Таланчук, М. Н. Фомин, и В. В. Сергеев, *Моделирование и оптимизация на ЭВМ измерительных преобразователей*. Киев: Вища шк., 1991.
- [16] В. Д. Шелягин, А. Г. Лукашенко, Д. А. Лукашенко, В. Ю. Хаскин, О. В. Сиора, та А. В. Бернацкий, "Спосіб лазерного зварювання", МПК (2012.01) В23К 26/00: пат. 68159 Україна, № и 2011 13985, заявл. Листоп. 28, 2011, опубл. Берез. 12, 2012, Бюл. № 5.
- [17] В. В. Лимаренко, И. П. Хавина, и А. Н. Рисованный, "Постановка и решение задачи параметрической оптимизации операций резания металлов и обработки материалов", *Системы управління, навігації та зв'язку*, Полтава, вип. 4 (44), с. 20-24, 2017.
- [18] В. В. Лимаренко, и И. П. Хавина, "Решение задачи оптимизации параметров обработки металлов при операции точения", *Радиоелектронні і комп'ютерні системи*, Харків, вип. 3 (83), с. 77-86, 2017.
- [19] А. В. Бернацкий, В. Д. Шелягин, О. В. Сиора, В. М. Сидорець, та О. М. Берднікова, "Влияние просторового положения при лазерном зварюванні на рівень якості зварних з'єднань зі сталі AISI 321", *Автоматичне зварювання*, № 1, с. 15-24, 2020.
- [20] A. Artinov, N. Bakir, M. Bachmann, A. Gumenyuk, and M. Rethmeier, "Weld pool shape observation in high power laser beam welding". *Procedia CIRP*, no. 74, pp. 683-686, 2018.
- [21] В. М. Нестеренков, Л. А. Кравчук, та М. О. Русиник, "Влияние технологических і металургійних факторів на формування зварних з'єднань міді при електронно-променевому зварюванні", *Автоматичне зварювання*, № 2, с. 38-42, 2021.
- [22] D. Yu. Yermolenko, V. V. Holovko, and S. M. Stepanuyk, "Cellular automata for simulation of dendritic growth with surface active refractory inoculants", *J. of Achieve-*

ments in Materials and Manufacturing Eng., 88, iss. 2, pp. 49-54, June, 2018.

- [23] В. Ю. Хаскін, В. М. Коржик, Ч. Донг, та С. В. Ілляшенко, "Підвищення ефективності лазерного зварювання шляхом зворотно-поступального переміщення фокуса", *Автоматичне зварювання*, № 1, с. 57-63, 2020.

References

- [1] V. N. Bernadsky, V. D. Shelyagin, and O. K. Makovetskaya, "Modern market of laser technology for welding and processing of materials", *Avtomaticheskaya svarka*, no. 10, 2007; "Mobile device for laser welding", *Ibid.*, no. 4, pp. 193-194, 2000 [in Russian].
- [2] H. Exner, J. Drechsel, S. Klotzer, und V. Neumann, "Handgeführtes Fügen: Laser-Bearbeitungs-kopf für mobiles Laserschweißen", *Laser-Prax*, № 3, S. 14-15, 1999; Bd. 1, S. 145-159, 2001.
- [3] S. Keitel, "Manuelles Laserstrahl-schweipen-Entwicklungs-perspektiven und Standder Anwendung", *Hochleistungs-fuegeverfahren-7 Inter. Aachener Schweiptechnik Kollo-gium*, Aachener, Dentchland, 3-4 Mai, 2001.
- [4] "Laserstrahl "Handschweissgerat" LHSG-1", *Techn.-inf. Halle: Berichte-SLV*, 2000.
- [5] "Laserstrahl "Handschweissgerat" LHSG-2", *Techn.-inf. Halle: Berichte-SLV*, 2000.
- [6] S. Celen, S. Karadeniz, and H. Ozden, "Effect of laser welding parameters on fusion zone morphological, mechanical and microstructural characteristics of AISI 304 stainless steel", *Materialwissenschaft und Werkstoff-technik*, № 39, 2008.
- [7] G. Daurelio, F. Memola Capece Minutolo, F. Curcio, and F. Caiazzo, "On the welding of austenitic/ferritic stainless steels by an High Power Diode Laser", *Proc. AMME'2003*, vol. 12, 7-10, pp. 187-190, December 2003.
- [8] A. Nobuyuki, F. Yoshinori, I. Takashi, and T. Masahiro, "Micro welding of thin stainless steel foil with a direct diode laser", *Transactions of JWRI*, vol. 34, no. 1, pp. 19-23, 2005.
- [9] A. G. Lukashenko, T. V. Melnichenko, and D. A. Lukashenko, "Laser welding of thin sheet stainless steel with modulated radiation", *Avtomaticheskaya svarka*, no. 4, pp. 19-23, 2012 [in Russian].
- [10] V. D. Shelyagin, A. G. Lukashenko, D. A. Lukashenko, V. A. Lukashenko, and V. Yu. Haskin, "Method of laser welding with pulse-width modulation of radiation", IPC (2014.01) B 23K 26/2: patent on the invention 109328 C2 Ukraine, no. a 2013 14855, appl. Dec. 18, 2013, publ. Aug. 10, 2015, Bull. no. 15 [in Ukrainian].
- [11] D. A. Lukashenko, A. G. Lukashenko, I. A. Zubko, R. E. Yupin, and V. M. Lukashenko, "Optimal method for determining the parameters of laser welding of thin-walled structures", *Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy*, no. 6/5 (54), pp. 48-51, 2011 [in Russian].
- [12] V. D. Shelyagin, A. G. Lukashenko, D. A. Lukashenko, A. V. Bernatskiy, V. P. Garashchuk, and V. I. Lutsenko, "Laser welding of thin sheet stainless steel", *Avtomaticheskaya svarka*, no. 4, pp. 45-49, 2011 [in Russian].
- [13] A. G. Lukashenko, V. D. Shelyagin, and V. M. Lukashenko, "Laser technological installation ARMA-100M", *Catalog of modern scientific developments and services of ChSTU*. Cherkasy: ChDTU, 2011 [in Ukrainian].
- [14] V. D. Shelyagin, D. A. Lukashenko, V. Yu. Khaskin, A. G. Lukashenko, A. V. Siora, and A. V. Bernatskiy, "Welding of thin-sheet stainless steel with a fiber laser", *Vestnik DNU. Raketno-kosmicheskaya tekhnika*, vol. 19, no. 4, pp. 121-129, 2011 [in Russian].
- [15] P. M. Talanchuk, M. N. Fomin, and V. V. Sergeev, *Computer modeling and optimization of measuring converters*. Kiev: Vischa shkola, 1991 [in Russian].
- [16] V. D. Shelyagin, A. G. Lukashenko, D. A. Lukashenko, V. Yu. Haskin, O. V. Siora, and A. V. Bernatskiy, "Method of laser welding", IPC (2012.01) B23K 26/00: patent 68159 Ukraine, no. u 2011 13985, appl. Nov. 28, 2011, publ. March 12, 2012, Bull. no. 5 [in Ukrainian].
- [17] V. V. Limarenko, I. P. Khavina, and A. N. Risovanny, "Formulation and solution of the task for parametric optimization of metal cutting and material processing operations", *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku*, Poltava, iss. 4 (44), pp. 20-24, 2017 [in Russian].

- [18] V. V. Limarenko, and I. P. Khavina, "Solution of the problem of optimization of metalworking parameters during turning operations", *Radioelektronni i kompiuterni systemy* Kharkiv, iss. 3 (83), pp. 77-86, 2017 [in Russian].
- [19] A. V. Bernatsky, V. D. Shelyagin, O. V. Siora, V. M. Sydorets, and O. M. Berdnikov, "Influence of spatial position during laser welding on the level of quality of welded joints made of AISI 321 steel", *Avtomatychne zvariuvannia*, no. 1, pp. 15-24, 2020 [in Ukrainian].
- [20] A. Artinov, N. Bakir, M. Bachmann, A. Gumenyuk, and M. Rethmeier, "Weld pool shape observation in high power laser beam welding". *Procedia CIRP*, no. 74, pp. 683-686, 2018.
- [21] V. M. Nesterenkov, L. A. Kravchuk, and M. O. Rusnyk, "Influence of technological and metallurgical factors on the formation of welded copper joints in electron beam welding", *Avtomatychne zvariuvannia*, no. 2, pp. 38-42, 2021 [in Ukrainian].
- [22] D. Yu. Yermolenko, V. V. Holovko, and S. M. Stepanuyk, "Cellular automata for simulation of dendritic growth with surface active refractory inoculants", *J. of Achievements in Materials and Manufacturing Eng.*, 88, iss. 2, pp. 49-54, June, 2018.
- [23] V. Yu. Haskin, V. M. Korzhik, Ch. Dong, and Ye. V. Ilyashenko, "Increase of the efficiency of laser welding by reciprocating focus shift", *Avtomatychne zvariuvannia*, no. 1, pp. 57-63, 2020 [in Ukrainian].

D. A. Harder

Cherkasy State Technological University
Shevchenko Blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

INFORMATION TECHNOLOGY OF PARAMETRIC OPTIMIZATION OF MODES OF AUTOMATED LASER WELDING IN CONDITIONS OF UNCERTAINTY

In this work, the problem of increasing the efficiency of information technology of parametric optimization under conditions of uncertainty for the modes of the process of automated laser welding of thin-walled steel structures is solved. Positive results have been achieved through the development of a specialized information database based on the results of experimental research. An information technology has been created for the analytical description of functional dependencies between the width of the weld and the speed of movement of the modulated laser radiation relative to the workpiece being processed at a constant radiation power; between the width of the weld and the laser radiation power at a constant motion speed.

Mathematical models of spline functions contribute to the automation of computational procedures, which reduces the time for determining the parameters for the laser welding mode and the amount of memory in the control microprocessor. The principle of decision-making for parametric optimization in conditions of uncertainty on the basis of the developed graph-analytical method is proposed. The method uses a graphic representation of spline functions built in a single quadrant with a common abscissa, the values of which correspond to the values of the weld. Coordinates of the point of intersection of functional dependencies on ordinates and abscissa determine the corresponding optimal parameters of the automated laser welding mode. Visualization of the principle of parametric optimization in conditions of uncertainty accelerates the process of technological preparation of production, which contributes to an increase in the productivity of the enterprise.

Keywords: laser, constructions, uncertainty conditions, graphoanalytical method, parametric optimization.

Стаття надійшла 19.02.2021

Прийнято 12.03.2021