

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЧЕРКАСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**ГАРДЕР ДМИТРО АНДРІЙОВИЧ**



УДК 004.383

**ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ  
ДЛЯ УПРАВЛІННЯ АВТОМАТИЗОВАНИМ ЛАЗЕРНИМ ЗВАРЮВАННЯМ  
ТОНКОСТІННИХ КОНСТРУКЦІЙ**

Спеціальність 05.13.06 – Інформаційні технології

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Черкаси – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Черкаському державному технологічному університеті Міністерства освіти і науки України

**Науковий керівник:**

доктор технічних наук, професор  
**Рудницький Володимир Миколайович**,  
Черкаський державний технологічний  
університет, завідувач кафедри  
інформаційної безпеки та комп'ютерної  
інженерії

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор  
**Кучук Георгій Анатолійович**,  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»,  
професор кафедри обчислювальної техніки  
та програмування

доктор технічних наук, професор  
**Квасніков Володимир Павлович**,  
Національний авіаційний університет,  
завідувач кафедри комп'ютеризованих  
електротехнічних систем та технологій

Захист відбудеться «30» вересня 2021 р. о 12<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 73.052.04 Черкаського державного технологічного університету за адресою: 18006, м. Черкаси, бульвар Шевченка, 460.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Черкаського державного технологічного університету за адресою: 18006, м. Черкаси, бульвар Шевченка, 460.

Автореферат розісланий «28» серпня 2021 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Ю. Ю. Бондаренко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Розвиток і вдосконалення інформаційних технологій сьогодні займають одне з пріоритетних місць у стратегії науково-технічного розвитку лазерних технологій та автоматизованих лазерних технологічних комплексів (АЛТК).

Такі пріоритетні галузі промисловості, як: оборонна, ракетно-космічна, суднобудування, приладобудування, медична, авіаційна та інші обумовлюють 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.

Проблематика полягає у 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. Крім того, деякі з'єднання тонкостінних конструкцій потребують високої міцності, повної герметичності та високої стійкості за умов тривалої роботи при високих температурах або в агресивному середовищі. У такому випадку частіше доводиться приймати рішення щодо визначення кращих параметрів режимів зварювання в умовах дії непередбачених факторів, що призводить або до зниження якості, або до збільшення вартості продукції через використання багатьох енергочасових, людських та матеріальних витрат на попереднє дослідження. Особливо це відчутно при дрібносерійному випуску продукції та при енергочасовому обмеженні.

Низку робіт В. В. Долгова, С. А. Жукова, Г. І. Колесникова, В. Ф. Лазукіна, В. Ф. Майбороди, С. Л. Погорельського, А. Г. Шипунова, Г. П. Піхновської, М. А. Абрамова, А. Carter, В. Samson, К. Tankala, D. P. Machewirth, V. Khitrov, U. H. Manuam, F. Gonthier та ін. присвячено питанням АЛТК. Однак наявні теоретичні та практичні напрацювання в галузі застосування високоефективних інформаційних технологій не є достатньо повними. Тому тема «Інформаційна технологія прийняття рішень для управління автоматизованим лазерним зварюванням тонкостінних конструкцій», в умовах дії непередбачених факторів є актуальною.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Напрямок дослідження дисертації пов'язаний з тематиками бюджетних науково-дослідних робіт Черкаського державного технологічного університету: «Методи, моделі при обробці інтелектуальних, інформаційних технологій для високоефективних обчислювальних та локальних підсистем управління в проблемно-орієнтованих системах» (№ д. р. 0106U004501); «Моделі локальних підсистем керування лазерним випромінюванням для рішення траєкторних задач на базі таблично-алгоритмічних методів апаратурної реалізації в проблемно-орієнтованих системах» № д. р. 0109U002739); «Таблично-алгоритмічні методи, моделі співпроцесорів та компонентів в мікропроцесорних системах керування для спеціалізованих лазерних технологічних комплексів» (№ д. р. 0111U002934); «Базові компоненти мікропроцесорних систем керування лазерними технологічними комплексами на основі таблично-алгоритмічних методів, моделей та теорії неповної подібності» (№ д. р. 0113U003345), в яких автор брав участь.

**Метою дослідження** є підвищення ефективності управління процесом автоматизованого лазерного зварювання в умовах дії непередбачених факторів шляхом створення: спеціалізованих інформаційних баз знань на основі реляційних відношень параметрів режимів лазерного зварювання за результатами експериментів; металографічних зображень макро-, мікроструктур зварного шва і колошовної зони за результатами комп'ютерно-експериментального моделювання; спеціалізованої інформаційної бази даних за рахунок інформаційної технології об'єктивного оцінювання компонентів апаратного забезпечення збору даних і управління через формування коефіцієнтів видачі релевантної інформації (КВРІ) на прикладах лазерних випромінювачів, волоконних лазерних модулів, скануючих елементів датчиків положення зварного стику тонкостінних конструкцій.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Провести аналіз наявних інформаційних технологій прийняття рішень в умовах дії непередбачених факторів на прикладі управління процесом зварювання тонкостінних конструкцій.

2. Побудувати спеціалізовану інформаційну базу знань на основі формування реляційних моделей основних параметрів режимів зварювання за результатами експериментальних досліджень в умовах дії непередбачених факторів.

3. Удосконалити спеціалізовану інформаційну базу знань шляхом створення якісних металографічних зображень дрібнозернистих макро-, мікроструктур зварного шва та колошовної зони стикових з'єднань тонкостінних конструкцій за результатами комп'ютерно-експериментального моделювання.

4. Визначити напрям розвитку інформаційної технології об'єктивного оцінювання багатопараметричних компонентів апаратного забезпечення збору даних.

*Об'єктом дослідження* є інформаційні технології управління процесами лазерних технологічних комплексів.

*Предметом дослідження* є інформаційна технологія прийняття рішень для управління автоматизованим лазерним зварюванням тонкостінних конструкцій.

**Методи дослідження.** Для вирішення поставлених у дисертації задач використовувалися такі методи: теорії інформаційних технологій для системного аналізу (для аналізу методів управління процесами зварювання та моделей компонентів АЛЗ), візуалізації (для відображення отриманих результатів), теорії множини (для відтворення реляційних моделей), теорії алгоритмів (для розробки алгоритмів), теорії експерименту при проведенні експериментальних досліджень, теорії прийняття рішень у складних умовах, теорії збору, переробки, збереження інформації та систем управління.

**Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що:**

1. Вперше побудовано спеціалізовану інформаційну базу знань на основі реляційних моделей параметрів режимів лазерного зварювання за результатами експериментальних досліджень в умовах дії непередбачених факторів, особливістю якої є визначення апроксимуючих математичних моделей залежностей ширини зварного шва від швидкості та потужності лазерного випромінювання, що забезпечило розробку графоаналітичних методів визначення найкращих інформаційних значень параметрів режимів управління процесом з'єднання тонкостінних конструкцій та візуалізацію їх результатів для прискорення цієї процедури в умовах дії непередбачених факторів.

2. Вперше розширено спеціалізовану інформаційну базу знань за рахунок створення множини якісних металографічних зображень дрібнозернистих макро-, мікроструктур зварного шва та колошовної зони стикових з'єднань тонкостінних конструкцій через управління кристалізацією модульованими імпульсами лазерного випромінювання складної форми та додатково шляхом частотного, амплітудного, широтно-імпульсного впливу комбінованого лазерно-ультразвукового випромінювання на основі запропонованих трьох методів створення умов зародження максимальної кількості центрів кристалізації при мінімізації лінійної швидкості росту кристалів для литого металу, що дозволило візуалізувати отриману інформацію та забезпечити високу швидкість її прийому, а також зменшити час на її освоєння.

3. Отримала подальший розвиток інформаційна технологія об'єктивного оцінювання багатопараметричних компонентів апаратного забезпечення збору даних за рахунок створення багатопараметричних критеріїв видачі релевантної інформації (КВРІ) та одночасному прирівнюванню до одиниці значень пріоритетності коефіцієнтів, що створює можливість представлення інформації у вигляді гістограм, візуалізація яких забезпечує високу швидкість прийому інформації проектувальником і, як наслідок, зменшує час на визначення та формування інформаційної системи бази даних з кращими компонентами та підвищує її надійність.

**Практичне значення одержаних результатів.** Практична цінність результатів полягає в доведенні отриманих наукових результатів до конкретних інженерних рішень:

- створено можливість застосування інформаційних технологій прийняття рішень при управлінні процесом автоматизованого лазерного зварювання тонкостінних конструкцій в умовах дії непередбачених факторів, що зменшує матеріальні, енергочасові витрати через зменшення витрат на відповідні попередні трудомісткі дослідження технологічної підготовки виробництва майже на 50 %, особливо це відчутно при дрібносерійному виробництві і, як наслідок, зменшується вартість виробу;

- реалізація інформаційної бази знань на основі реляційних моделей параметрів режимів лазерного зварювання металів за результатами експериментальних досліджень в умовах дії непередбачених факторів і візуалізація графіків залежностей цих параметрів, побудованих на базі створених графоаналітичних методів, дають можливість прискорити процес прийому інформації на 3,...,4 порядки;

- сформульовано методіку визначення кращих інформаційних параметрів режиму лазерного зварювання тонкостінних конструкцій для досягнення максимального значення використання потужності лазерного випромінювання, високий коефіцієнт ефективності якого становить 33% в умовах дії непередбачених факторів.

- створено схему відношень металографічних зображень зварного шва та частоти проходження модульованих лазерних імпульсів, яка впливає на їх структури на макро- і мікрорівнях. На прикладі зварювання конструкцій зі сталі марки 1,4541 і товщиною  $\delta=0,2$  мм за результатами експерименту визначено взаємозв'язок між значенням діапазону частоти проходження модульованих лазерних імпульсів з найкращим значенням (а саме 2,0 ..., 3,0 кГц) і малим розміром аустенітного зерна  $\leq 3$  мкм, що підтверджує високу якість з'єднання тонкостінних конструкцій.

Ця корисна інформація збирається та зберігається для подальшого її використання в умовах підприємства, що підвищує його продуктивність.

Практичне значення результатів дослідження та розробок підтверджено актами та довідками про наукову значущість, практичне використання і можливість впровадження у виробництво в промисловості України та Молдови.

Наукова й інженерно-технічна новизна результатів дослідження підтверджується публікаціями у періодичних виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз Scopus або Web of science, патентами на винахід України, актами впровадження та довідками про наукову значущість. Теоретичні та практичні результати дослідження прийнято для впровадження: на НВК «Фотоприлад» (м. Черкаси) та в «INSTITUTUL DE ENERGETIC ACADEMIA ȘTIINȚĂ MOLDOVEI» (Republica Moldova); а також використовуються у навчальному процесі Черкаського державного технологічного університету на кафедрі робототехніки та спеціалізованих комп'ютерних систем.

**Особистий внесок здобувача** полягає в дослідженні наявних і розробці нових методів, моделей інформаційної технології при прийнятті рішень для управління автоматизованим лазерним зварюванням тонкостінних конструкцій в умовах дії непередбачених факторів. Викладені в дисертації теоретичні, розрахункові результати та експериментальні дослідження і висновки, що виносяться на захист, отримано особисто автором у період з 2009 по 2021 рр., опубліковано в 51 науковій роботі й узагальнено під час оформлення дисертації. Роботу [3] написано безпосередньо автором. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, автору належать: збір інформаційних даних компонентів і об'єктивне оцінювання об'єктів дослідження [2, 5, 7, 9, 14, 18, 22, 24, 26, 33, 37–39]; методи апроксимації сплайн-функціями, КЛА та розрахунки [1, 21, 23, 36]; пошук аналогів [4]; проведення експериментів і застосування методів для управління об'єктами [17, 19, 27, 29, 30, 35]; додаткова модель для візуалізації інформації [6]; застосування багатофункціональної моделі для управління лазерним технологічним комплексом [8, 28]; застосування методів параметричної оптимізації режиму зварювання [10, 12, 25]; проведення експериментів, збір і збереження інформації макро-, мікроструктур зварного шва та колошовної зони [13, 15, 16, 20, 41]; засоби апаратного забезпечення системи збору даних [11, 31, 34, 42–49]; проведення комп'ютерно-експериментального дослідження [32]; схема класифікації [40]; управління кристалізацією [50, 51].

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на восьми міжнародних та всеукраїнських наукових конференціях: на ІХ МНПК «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій – 2018», (м. Запоріжжя, Україна, жовт. 3–5, 2018); XIV MVPK “Dny Vědy – 2018”, (Praha, Břez. 22–30, 2018); XIII ISPC “Science without borders – 2017”, (Sheffield, England, Mar. 30–Apr. 7, 2017); II МНПК «Інформаційні технології та взаємодії – 2015», (Київ, Україна, листоп. 3–5, 2015.); ІХ МНПК «Настоящи изследвания и развитие – 2013», (Софія, Болгарія, яну. 17–25, 2013); VIII MVPK “Aktuální vzmoženosti vědy – 2012”, (Praha, čer. 27–červ. 5, 2012); VIII МНПК «Новината за напреднали наука – 2012», (Софія, Болгарія, мая 17–25, 2012); V MVPK “Vědecký pokrok na rozmezí millennium – 2009”, (Praha, Чехія, květ. 27–čer. 5, 2009).

**Публікації.** Результати дослідження, подані в дисертації, опубліковано в 51 науковій праці, серед яких – 1 монографія, 34 статті у наукових фахових виданнях (з них 3 – у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз Scopus або Web of science, 8 – у виданнях іноземних держав), 9 патентів України (з них

8 патентів на винахід, 1 корисна модель), 8 тез доповідей у збірниках матеріалів міжнародних конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних літературних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертації становить 154 сторінок, із них 121 сторінок основного тексту, 47 рисунки, 9 таблиць, 2 додатки обсягом 25 сторінок. Список використаних джерел містить 126 найменування.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** надано загальну характеристику роботи: обґрунтовано актуальність теми, зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами; сформульовано мету і завдання дослідження, об'єкт дослідження, предмет дослідження, методи дослідження; висвітлено наукову новизну одержаних результатів, практичне значення отриманих результатів, особистий внесок здобувача; наведено відомості про публікації, апробацію та використання результатів дослідження.

У **першому розділі** проведено аналіз стану предмета дослідження, визначено проблематику, підтверджено актуальність теми, сформульовано основні завдання дослідження: побудувати спеціалізовану інформаційну базу знань на основі реляційних моделей основних параметрів режимів зварювання за результатами експериментальних досліджень в умовах дії непередбачених факторів; удосконалити спеціалізовану інформаційну базу знань на основі реляційних моделей якісних металографічних зображень дрібнозернистих макро-, мікроструктур зварного шва та колошовної зони стикових з'єднань тонкостінних конструкцій за результатами комп'ютерно-експериментального моделювання; визначити напрям розвитку інформаційної технології об'єктивного оцінювання багатопараметричних компонентів апаратного забезпечення збору даних і управління.

У **другому розділі** побудовано спеціалізовану інформаційну базу знань на основі реляційних моделей параметрів режимів зварювання за результатами експериментальних досліджень шляхом встановлення залежності між параметрами в умовах дії непередбачених факторів.

За результатами дослідження впливу швидкості ( $V$ ) і потужності ( $P$ ) лазерного випромінювання на ширину зварного шва ( $b$ ) створено інформаційну модель знань на основі реляційних моделей значень ширини шва зварювання, швидкості та потужності режиму зварювання тонкостінних конструкцій. Приклади реляційних моделей показано на трьох зразках і наведено: у табл.1  $b(V)$  при  $P_i = \text{const}$ ; у табл.2  $b(P)$  при  $V_i = \text{const}$  та різних типах сталі.

Першими атрибутами у табл. 1 і табл. 2 є номер зразків №, тип сталі, товщина стрічки  $\delta$ , величина потужності випромінювання  $P$  (табл. 1) та величина швидкості зварювання (табл. 2), їх відповідні домени мають кортежі швидкості зварювання (або потужності випромінювання) і відповідні значення ширини шва.

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

Таблиця 1

**Реляційна модель значень швидкості та ширини шва зварюваного з'єднання за результатами експерименту**

1	Зразок № 1, сталь 12Х18Н10, $\delta=0,15$ 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
2	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	-	-	-	-
		Ширина шва $b$ , мм	0,88	0,73	0,69	0,64	0,59	0,52	0,5	0,45	-	-	-
3	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	-	-	-	-
		Ширина шва $b$ , мм	0,75	0,68	0,65	0,62 5	0,61	0,58	0,54	0,49	-	-	-

Таблиця 2

**Реляційна модель значень потужності лазерного випромінювання та ширини шва зварюваного з'єднання за результатами експерименту**

1	Зразок № 1, сталь 12Х18Н10Т, $\delta=0,15$ мм при швидкості $V=1,5 \cdot 10^{-2}$ , 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	-
2	Зразок № 2, сталь 1.4541, $\delta=0,15$ мм при швидкості $V=0,8 \cdot 10^{-2}$ , 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	
3	Зразок № 3, сталь 1.4541, $\delta=0,2$ мм при швидкості $V=0,8 \cdot 10^{-2}$ , 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 (табл. 2) показав, як впливає значення потужності лазерного випромінювання при постійному значенні швидкості лазерного зварювання на ширину шва зварюваного з'єднання, а саме:  $b$  збільшується при збільшенні  $P$ . Аналіз схем розглянутих вище відношень підтвердив важкість визначення найкращих параметрів режимів зварювання через суперечність впливу на ширину шва зварювання  $b$  значень параметрів  $V$  та  $P$ . Для розв'язання цієї проблемної задачі пропонується створити математичні моделі для опису цих залежностей і розробити графоаналітичний метод, що ґрунтується на використанні функціональних  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  залежностей між шириною шва зварювання, швидкістю і потужністю режиму зварювання  $b_1 = \varphi_1(V_i, P_j)$ ;  $b_2 = \varphi_2(P_i, V_j)$ , де індекс «і» показує належність до поточного значення відповідного параметра: або  $V_i$ , або  $P_i$ , індекс «j» належить параметру значення, що дорівнює відповідній незмінній величині: або  $P_j \rightarrow \text{const}$ , або  $V_j \rightarrow \text{const}$ . На підґрунті реляційних моделей за експериментальними даними (табл. 1 і табл. 2) в роботі запропоновано дві апроксимуючі функції, а саме:



гіперболічна та сплайн-функції. Графічні результати експериментів, апроксимовані гіперболічною функцією (1), зображено на рис. 1 та рис. 2.

$$b = 2,981 \cdot 10^{-3} + \frac{1,163}{v} \quad (1)$$

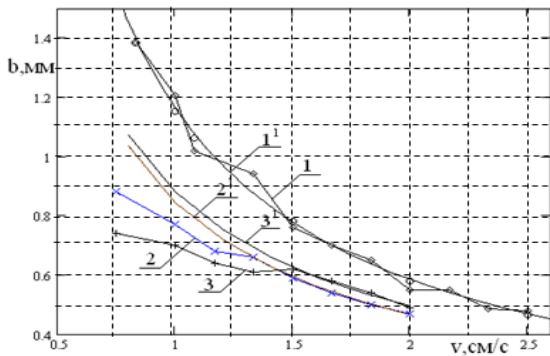


Рис. 1. Залежність ширини зварного шва  $b$  від швидкості лазерного зварювання  $V$   
Цифри 1, 2, 3 відповідають табл. 1  
( $\cdot$ ) – апроксимовані функції (1)

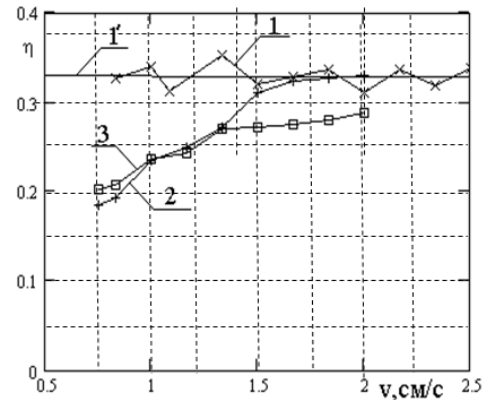


Рис. 2. Залежність коефіцієнта корисної дії  $\eta$  від швидкості зварювання  $V$   
Цифри 1, 2, 3 відповідають табл. 1  
( $\cdot$ ) – апроксимовані функції (1)

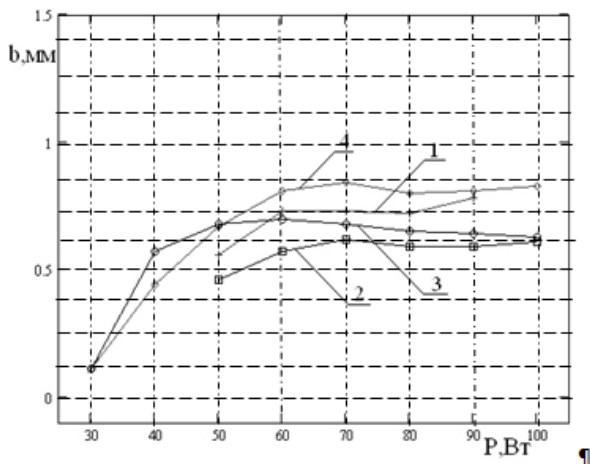


Рис. 3. Залежність ширини зварного шва  $b$  від потужності  $P$  лазерного випромінювання  
Цифри 1, 2, 3 відповідають табл. 2

Аналіз залежності  $b(P)$  при швидкості  $V_{зв} = \text{const}$  (рис. 3) показав, що значення ширини зварного шва  $b$  залишається майже незмінним, якщо  $P \geq 60$  Вт, тому приймаються значення швидкості  $V_{зв.i} = V_{зв.i \text{ max}} = \text{const}$ , які підтверджені експериментами.

Запропоновано коефіцієнт оцінювання ефективності використання потужності лазерного випромінювання  $\eta = q / P$ , де  $q = T_{пл} \cdot V \cdot \gamma \cdot b / 0,484$ ;  $q$  – теплова потужність;  $T_{пл}$ , °C – температура плавлення металу;  $\gamma$  – об'ємна теплоємність. Інформаційний аналіз залежностей  $\eta$  від швидкості (рис.2) зварювання показав, що краще значення  $\eta = 0,33$  при  $V = 1,4 \dots 2,0$  см/с.

Сформульовано методику визначення кращих параметрів режиму лазерного зварювання для досягнення максимального значення потужності лазерного випромінювання, високий коефіцієнт ефективності становить 33%. Аналіз результатів апроксимації (рис.1, рис.2) експериментальних даних гіперболічною функцією (1) показав, що при швидкості до 1,4 см/с апроксимуюча функція (1) добре збігається тільки для зразка № 1, але для зразків № 2 і № 3 не відповідає вимогам апроксимації через велику похибку, тобто необхідно визначити іншу функцію.

Пропонується створити математичні моделі на основі апроксимуючих сплайн-функцій, при використуванні яких забезпечується можливість прийняття рішень щодо визначення кращих значень параметрів режимів процесу автоматизованого лазерного зварювання тонкостінних конструкцій в умовах дії непередбачених факторів. У табл.3 наведено математичні моделі (ММ) апроксимуючих сплайн-функцій, що дало можливість створити графоаналітичні методи визначення найкращих значень  $V$ ,  $P$  і  $b$  одночасно (приклад зображено на рис.4 та рис. 5).

## Математичні моделі апроксимуючих сплайн-функцій

1	Зразок № 1, сталь 12X18H10, $\delta=0,15$ мм	$b_1(V) = -0,1138 \cdot V^3 + 0,8768 \cdot V^2 - 2,4432 V + 2,8669$ , при $P_{\Pi} = 65$ Вт
		$b_1(P) = -0,000007 \cdot P^3 + 0,0007 \cdot P^2 + 0,0141 \cdot P - 0,7589$ , при $V = 1,5 \cdot 10^{-2}$ м/с
2	Зразок № 2, сталь 1.4541, $\delta=0,15$ мм	$b_2(V) = -0,0805 V^3 + 0,4831 V^2 - 1,2087 V + 1,5782$ , при $P_{\Pi} = 55$ Вт
		$b_2(P) = -0,000015 \cdot P^3 - 0,0034 \cdot P^2 + 0,256 \cdot P - 5,6046$ , при $V = 0,8 \cdot 10^{-2}$ м/с
3	Зразок № 3, сталь 1.4541, $\delta=0,2$ мм	$b_3(V) = -0,1895 V^3 + 0,7943 \cdot V^2 - 1,2602 V + 1,3475$ , при $P_{\Pi} = 60$ Вт
		$b_3(P) = 0,000006 \cdot P^3 - 0,0014 \cdot P^2 + 0,1111 P - 2,3337$ , при $V = 0,8 \cdot 10^{-2}$ м/с

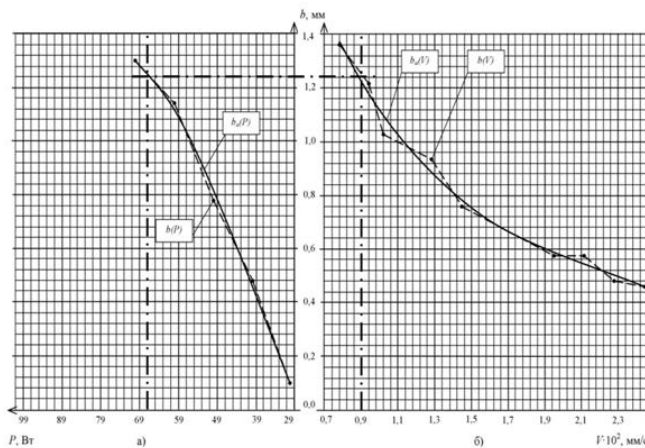


Рис. 4. Залежність ширини зварного шва від:  
а) потужності випромінювання  $P$ ;  
б) швидкості лазерного зварювання  $V$

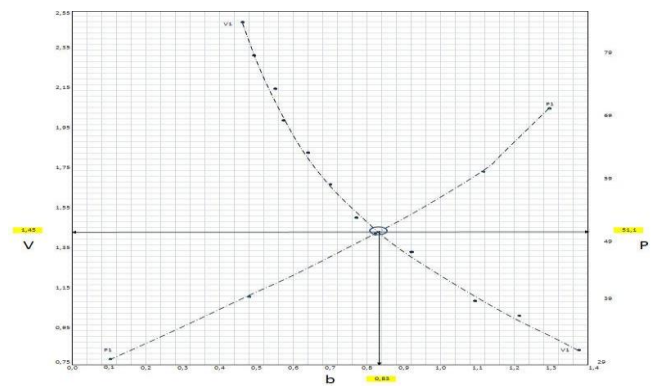


Рис. 5. Графік визначення найкращих параметрів процесу лазерного зварювання тонкостінних конструкцій зі сталі 12X18H10T для зразка № 1

Синтез залежностей  $V(b)$  і  $P(b)$  для зразків № 1, № 2, № 3 (рис. 6) забезпечує при їх збереженні малий об'єм пам'яті та прискорення прийому інформації на 3...4 порядки. Верифікація за розрахунками підтвердила збіг результатів, отриманих експериментально (рис. 6) і теоретично (табл. 3, рис. 7), через відповідні розрахунки, які наведено в дисертації.

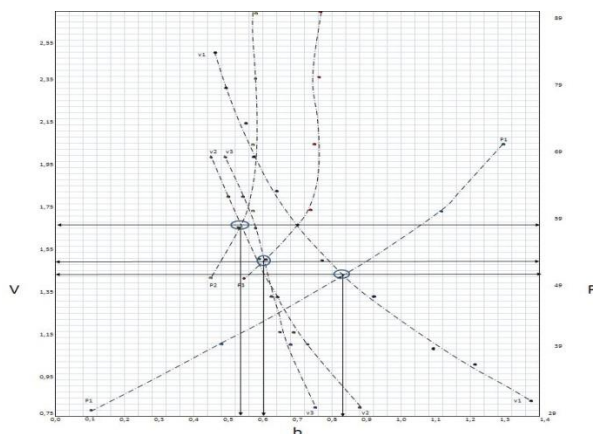


Рис. 6. Синтез графіків визначення кращих значень параметрів режимів зварювання за відповідними експериментальними залежностями  $V(b)$ ,  $P(b)$  та  $b$  для зразків № 1, № 2, № 3

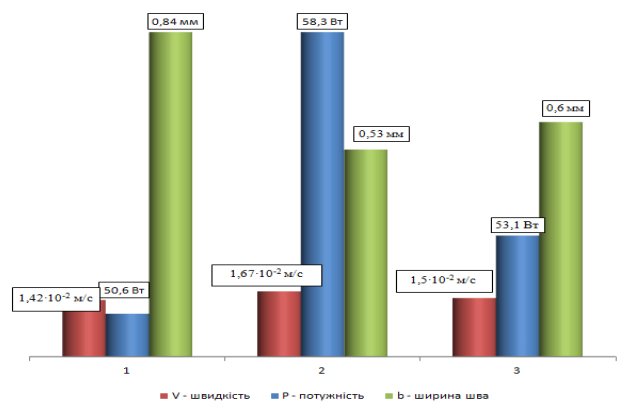


Рис. 7. Гістограми теоретичних значень параметрів  $V$ ,  $P$  режимів лазерного зварювання та ширини зварного шва  $b$  для зразків № 1, № 2, № 3  
Цифри 1, 2, 3 відповідають номеру зразка

Отже, в умовах дії непередбачених факторів за результатами експериментів зібрано, оброблено та збережено інформацію про кращі значення швидкості зварювання та потужності лазерного випромінювання у вигляді їх реляційних моделей до відповідних типу сталі та товщини конструкції, що зварюється встик на відповідному підприємстві.

Таким чином, створюється спеціалізована інформаційна база знань, перевагами якої є наочність і легкість сприйняття інформації, це прискорює процес отримання відповідної інформації та зменшує час етапів проектування і підготовки, що зменшує вартість виробу.

У **третьому розділі** розширено спеціалізовану інформаційну базу знань за допомогою створення множини якісних металографічних зображень дрібнозернистих макро-, мікроструктур зварного шва та колошовної зони стикових з'єднань тонкостінних конструкцій через управління кристалізацією модульованими імпульсами лазерного випромінювання складної форми (рис. 8) та додатково шляхом частотного, амплітудного, широтно-імпульсного впливу комбінованого лазерно-ультразвукового випромінювання за допомогою запропонованих трьох методів створення таких умов.

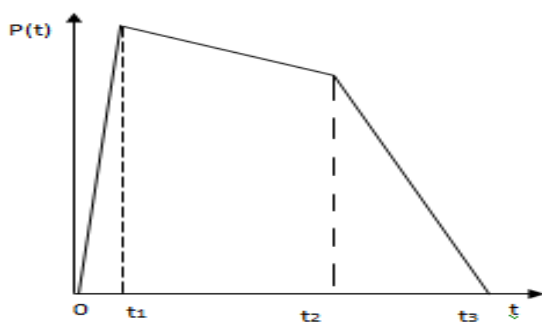


Рис. 8. Форма імпульсу модулюючого лазерного випромінювання

Відмітною особливістю імпульсу лазерного випромінювання є крутий передній фронт; задній фронт імпульсів має дві похилі ділянки: верхня ( $t_1; t_2$ ) забезпечує плавлення металу без випаровування; нижня ( $t_2; t_3$ ) забезпечує утворення дрібнозернистої структури зварного шва через створення умови зародження максимальної кількості центрів кристалізації (max ЦК) при мінімізації лінійної швидкості росту кристалів (min ЛШРК) для металу, що зварюється, тобто умови [(max\_ЦК) при (min\_ЛШРК)] (2)

Першим методом управління кристалізацією є створення умови (2) через зміну частоти проходження модульованих лазерних імпульсів.

У роботі для проведення комп'ютерно-експериментального моделювання розроблено програму та методику дослідження.

Аналіз результатів проведених досліджень за допомогою комп'ютерно-експериментального моделювання, що зображено на рис. 9, підтвердив залежність макро-, мікроструктур зварного шва, колошовної зони та розподілів основних компонентів і мікротвердості від зміни частоти проходження модульованих лазерних імпульсів.

Отже, підвищення частоти модуляції сприяє збільшенню кількості центрів кристалізації і формуванню дрібнозернистої мікроструктури; застосування нахилу заднього фронту імпульсу лазерного випромінювання забезпечує зменшення зростання кристалітів, що також приводить до формування дрібнозернистої мікроструктури.

Однак вплив частоти проходження імпульсів модульованого лазерного випромінювання на структуру зварного шва має обмеження; для наведеного прикладу визначено, що найкращі параметри частоти проходження лазерного імпульсу забезпечуються при 2000, ..., 3000 Гц. Водночас формування структурно-однорідного шва забезпечується з мінімальним розміром ( $\leq 3$  мкм) аустенітного зерна.

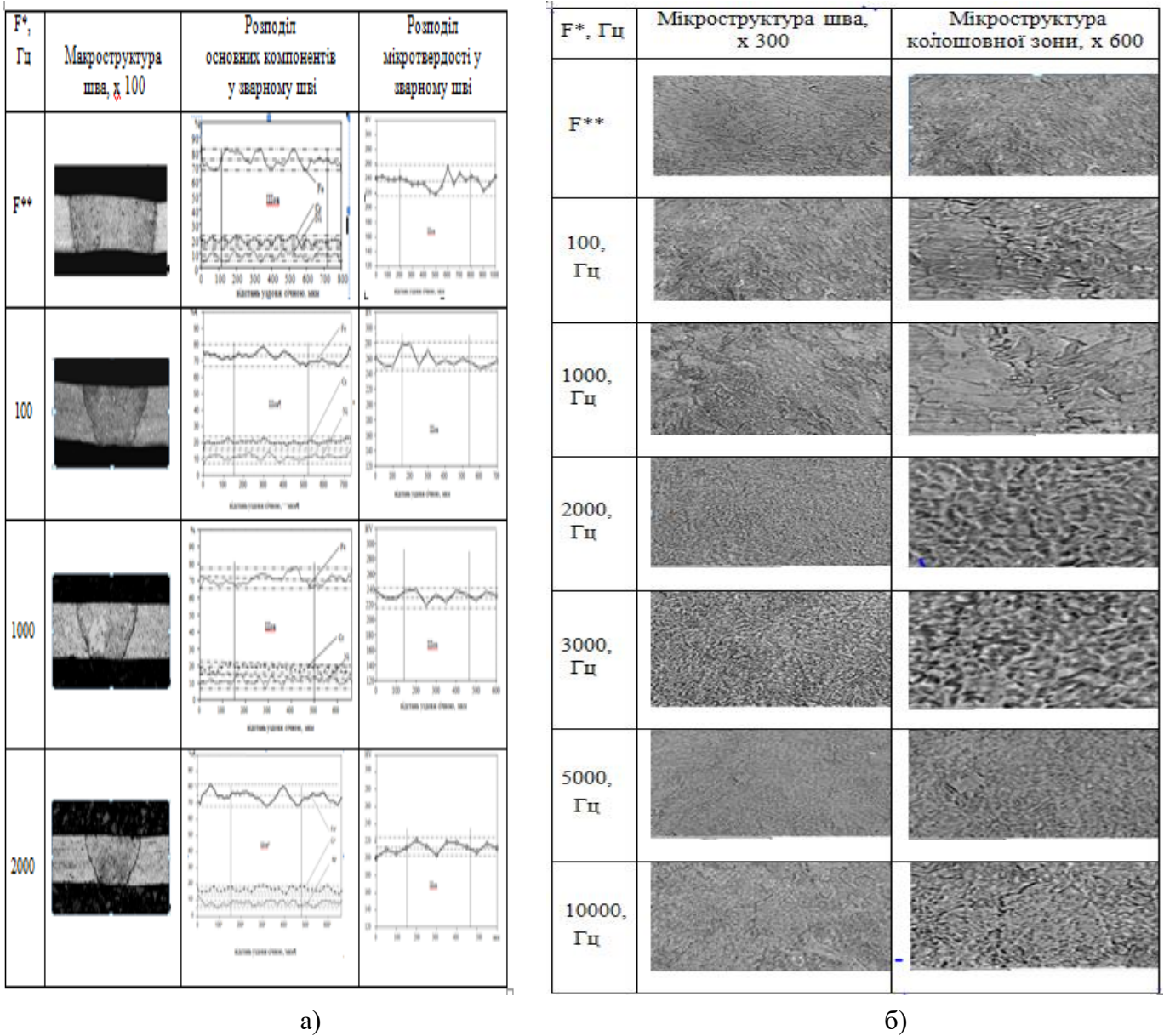


Рис. 9. Зображення зміни кристалізації морфоструктури зварного з'єднання під управлінням частоти проходження модульованих лазерних імпульсів:

- а) макроструктур шва, розподіл основних компонентів і мікротвердості;  
 б) мікроструктур шва і колошовної зони з'єднаних конструкцій

$F^*$ – частота проходження імпульсів лазерного випромінювання;

$F^{**}$ – безперервне випромінювання

Другим методом формування умов (2) є зародження максимальної кількості центрів кристалізації та мінімізації лінійної швидкості росту кристалів для металу, що зварюють шляхом амплітудного модулювання частотою ультразвукового діапазону при забезпеченні потрібного нахилу нижньої ділянки і коливанні зварювальної ванни. Враховуючи це, запропоновано форму складного модулюючого імпульсу, вид якої зображено на рис. 10. Однак цей метод має обмеження амплітуди ультразвукових коливань, що знижує його ефективність.



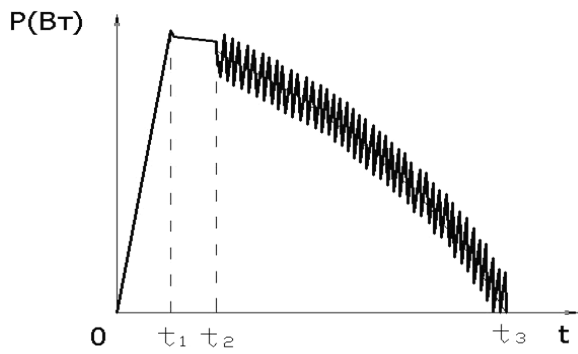
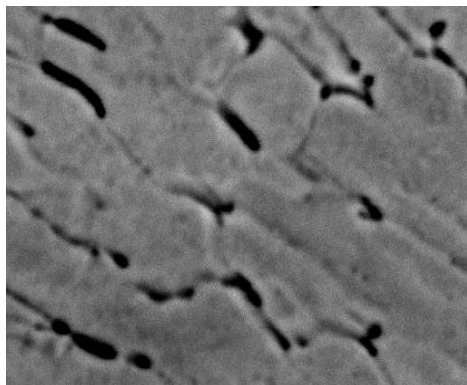


Рис. 10. Удосконалена модель модулюючого імпульсу

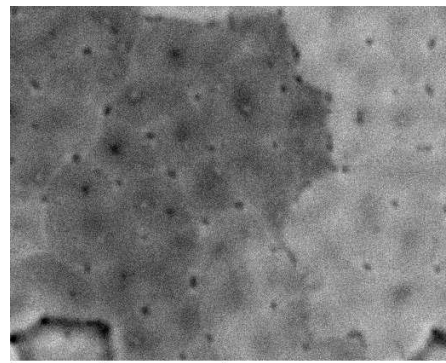
Особливість модулюючого імпульсу (рис. 10) полягає в тому, що нижня ділянка заднього фронту імпульсу модульована частотою ультразвукового діапазону з амплітудою, що забезпечує, при потрібному нахилу ділянки, деструкцію кристалітів, утворюючи нові центри кристалізації, водночас функція першої ділянки не змінюється, тобто плавлення проводиться без інтенсивного випаровування.

Дрібнозерниста структура зварного шва утворюється за рахунок створення умови для зародження максимальної кількості центрів кристалізації й мінімальної лінійної швидкості росту кристалів в області зональних фазових переходів «ліквідус-солідус» зварюваного металу.

Третій вдосконалений метод вирішує задачу підвищення ефективності лазерного зварювання, що здійснюється шляхом використання комплексного лазерно-ультразвукового впливу на зварювальну ванну. Сутність методу лазерного зварювання полягає в тому, що локально плавлять метал в зоні зварювання імпульсами складної форми сфокусованого лазерного випромінювання. Імпульси зі складною конфігурацією формуються методом широтно-імпульсної модуляції лазерного випромінювання, які йдуть з частотою ультразвукового діапазону і максимально допустимою амплітудою. Це забезпечує рівноважну дрібнозернисту мікроструктуру зварного шва (рис. 11 б).



а)



б)

Рис. 11. Мікроструктури зварного шва за умов [(max ЦК) при (min ЛШРК)]:  
для режиму неперервного (а) та імпульсного (б) випромінювання  
(частота проходження – 150 кГц) при зварюванні сталі 08X18H10T  
потужністю близько 60 Вт

Візуалізація через порівняльний аналіз мікроструктур при різних режимах впливу на метал підтверджує переваги запропонованого методу, що полягають у наявності більш дрібнозернистої мікроструктури металу зварного шва.

У четвертому розділі наведено подальший розвиток інформаційної технології об'єктивного оцінювання компонентів апаратного забезпечення збору даних (КАЗЗД) і управління через критерії видачі релевантної інформації.

Важливим завданням при вирішенні апаратного забезпечення збору даних і управління є визначення із множини відповідних кращих компонентів і обладнання, для цього необхідно провести їх дослідження, враховуючи цілий спектр техніко-економічних показників (прикладом є результат дослідження сучасних лазерних випромінювачів, волоконних модулів, скануючих елементів датчиків положення зварного стику тонкостінних конструкцій, що наведено в табл. 4, 5, 6 відповідно).

Таблиця 4

**Реляційна модель основних техніко-економічних показників  
сучасних лазерних випромінювачів різних типів**

Параметр	Тип лазерних випромінювачів				
	Використання в промисловості	YAG-Nd лазери з ламповим накачуванням	YAG-Nd лазери з діодним накачуванням	Діодні лазери	Волоконні лазери
		1	2	3	4
P – вихідна потужність, кВт	1...30	1...5	1...4	1...4	1...30
$\eta$ – ККД, %	$\eta > 20$	2...3	4...6	25...30	2...25
D – дальність доставки випромінювання волокном	10...300	20...40	20...40	10...50	10...300
Ст – стабільність вихідної потужності, умов. од.	→1	0	0	1	1
Ч – чутливість до зворотного відбиття випромінювання, умов. од.	→ 0	1	1	0	0
M – займана площа, умов. од.	якомога менше	22	18	8	1,0
B – вартість монтажу, умов. од.	якомога менше	1	0,8	0,2	0,05
B – вартість експлуатації, умов. од.	якомога менше	1	0,6	0,2	0,13
B – вартість обслуговування, умов. од.	якомога менше	1	4...12	4...10	0,1
H – періодичність заміни ламп або лазерних діодів, год.	якомога менше	300... 500	2000... 5000	3000... 5000	50000... 70000

За наведеними в табл. 4 техніко-економічними показниками створюється інформаційна модель узагальненого виду:

$$\varphi(P_{max}, P_{min}, B_{max}, B_{min}, \eta_{max}, \eta_{min}, H_{max}, H_{min}, C, \text{Ч}, M, D_{max}, D_{min}). \quad (3)$$

Враховуючи відсутність взаємозв'язку між параметрами, пропонується використовувати умовне моделювання і властивості теорії розмірностей для створення критеріїв видачі релевантної інформації (КВРІ), які мають вигляд:

$$K_p = \frac{P_{max} - P_{min}}{P_{max}} \rightarrow max; K_B = \frac{B_{max} - B_{min}}{B_{max}} \rightarrow min; K_\eta = \frac{\eta_{max} - \eta_{min}}{\eta_{max}} \rightarrow max; \quad (4)$$

$$K_H = \frac{H_{max} - H_{min}}{H_{max}} \rightarrow min; K_D = \frac{D_{max} - D_{min}}{D_{max}} \rightarrow max; K_{Cm} \rightarrow max; K_c \rightarrow min; K_m \rightarrow min,$$

це безрозмірні величини, що мають такі відповідні фізичні тлумачення: енергетичні можливості; вартість; ККД; ненадійність; відстань доставки лазерного випромінювання; стабільність вихідної потужності; чутливість до зворотного відбиття випромінювання; займана площа.

Узагальнений КВРІ визначається за формулою

$$K_{\Sigma\text{лаз}} = \sum_{i=1}^k K_{imax} + \sum_{j=1}^m \frac{1}{K_{jmin}}. \quad (5)$$

Кожний узагальнений КВРІ є об'єктивним оцінюванням лазерних випромінювачів за багатьма показниками.

За результатами розрахунків  $K_\Sigma$  побудовано гістограму (рис. 12), яка зберігається у спеціалізованій базі знань підприємства, візуалізація якої забезпечує прискорення швидкості прийому інформації дослідником майже на 3...4 порядки.

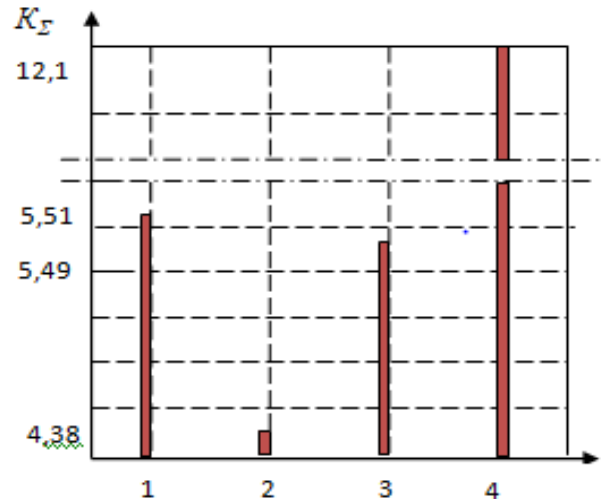


Рис. 12. Гістограма узагальнених критеріїв видачі об'єктивного оцінювання лазерних випромінювачів за багатьма показниками  
Цифри 1, 2, 3, 4 відповідають табл. 4

При проектуванні автоматизованих лазерних комплексів інтерес становлять волоконні лазерні модулі, що розглядаються нижче. За результатами аналізу вітчизняних та закордонних джерел інформації про сучасні типи лазерних модулів побудовано реляційну модель основних технічних показників (табл. 5), створено узагальнену інформаційну модель (5) та КВРІ (показників) (6):

$$\Psi(P_L; P_M; T_{max}; T_{min}; D_i, D_{max}), \quad (5)$$

$$K_p = \frac{P_L}{P_M} \rightarrow max; K_C \rightarrow min; K_D = \frac{D_{max}}{D_i} \rightarrow max, \quad (6)$$

$$D_{max} = 30 \text{ м}; K_T = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{max}} \rightarrow max.$$

Для збереження інформації в умовах підприємства та забезпечення високої швидкості прийому інформації для проектувальника побудовано гістограми, які зображено на рис. 13.

Аналіз множини із табл. 5, за розрахунками КВРІ, що дорівнює  $K_{\Sigma \text{ л. мод}} = 3,28$ , показав, що кращою моделлю є № 5.

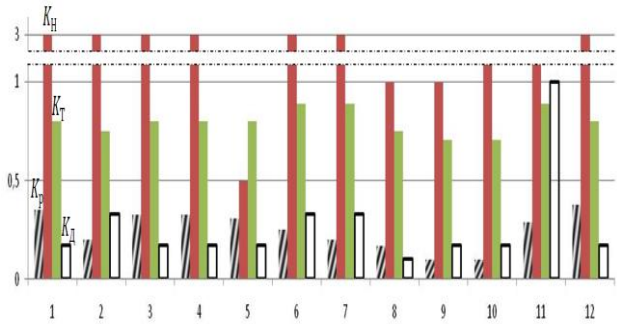


Рис. 13. Гістограми критеріїв видачі релевантної інформації об'єктивного оцінювання за багатьма показниками волоконних лазерних модулів. Цифри 1...12 відповідають табл. 5

Таблиця 5

### Реляційна модель основних технічних показників сучасних волоконних лазерних модулів різних типів

№ з/п	Тип лазерного модуля	Параметр					
		Вихідна потужність лазера, $P_{\text{л}}$ , кВт	Максимальна нестабільність вихідної потужності лазера, %	Потужність споживання лазерного модуля, $P_{\text{м}}$ , кВт	Робоча температура, °C		Дальність передачі по оптоволоконно му кабелю, $D$ , м
					$T_{\text{min}}$	$T_{\text{max}}$	
1	YLR-700-MM-WC-Y14	0,7	3	2	10	50	5
2	ЛС-04	0,4	3	2	10	40	10
3	YLR-700-WC-Y14	0,7	3	2,1	10	50	5
4	YLR-1000-MM-WC-Y14	1	3	3	10	50	5
5	2-1000-WC-Y14	1	0,5	3,2	10	50	5
6	JK400FL	0,4	3	1,6	5	45	10
7	JK50FL	0,05	3	0,25	5	45	10
8	YLR-150/1500-QCW-AC-Y14	0.25	1	1,5	10	40	3
9	YLR-300/3000-QCW-MM-AC-Y14	0.3	1	3	10	35	5
10	YLS-600/6000-QCW-AC-Y15	0.6	2	6	10	35	5
11	YLS-2000-U-Y18	0.6	2	6	10	35	5
12	YLR-2000-MM-WC-Y18	2	3	5,2	10	50	5

Одним із найбільш вагомих компонентів автоматизованих систем управління процесом зварювання є датчики положення стику зварювальних деталей. В роботі проведено системний аналіз наявних датчиків, які широко використовуються при автоматизації процесу зварювання металоконструкцій. Виявлено основні особливості та якісні характеристики датчиків положення стику зварювання тонкостінних конструкцій, а саме: тип сучасних датчиків, їх принципи дії та методи вимірювання відхилення стику від заданої траєкторії, переваги та недоліки. Збір і зберігання цієї інформації на підприємстві дають змогу: полегшити та прискорити процес порівняння і визначити найкращий для заданих умов процесу зварювання тип датчика; бачити



перспективи розвитку датчиків положення стику зварювальних деталей при проектуванні лазерних технологічних комплексів, у складі яких вони використовуються. Отже, встановлено, що найкращими слідкуючими датчиками є безконтактні, робота яких базується на оптичних принципах, вони мають високу надійність й експлуатаційну технологічність, наприклад датчики на основі ПЗС-матриць, ПЗС-лінійок. Водночас жорсткі вимоги висуваються до скануючих пристроїв при передачі прийнятої високоточної інформації для її обробки, тобто до забезпечення високої інформаційної надійності. Тому в дисертаційній роботі на підставі проведеного дослідження множини сучасних ІС (рис. 14) запропоновано сканер, побудований на базі ІС Б1110КН1-2. Особливостями цього сканера є вхідний інформаційний струм, що дорівнює  $10^{-11}$  А, та великий енергетичний резерв кристалу через малу потужність споживання (0,1 мВт), він має передпідсилювач, виконаний в єдиному кристалі, це забезпечує високу експлуатаційну надійність.

Таблиця 6 | Р<sub>р</sub>/Р<sub>с</sub>  
Реляційна модель основних технічних показників сучасних скануючих пристроїв різного типу

№ пп	Тип скануючих пристроїв	Параметри					
		R <sub>вх</sub> , Ом	f, МГц	P <sub>с</sub> , мВт	P <sub>р</sub> , мВт	T, °C	C, пФ
1	DG506	400	0,3	76,6	282,6	85	5
2	AV6-4016	200	0,4	59,4	282,6	85	10
3	K1104КН1	400	2,0	6,7	282,6	85	10
4	Б1110КН1-2	400	1,0	0,1	543,5	25	5
5	733КН1-2	400	0,5	40	500	35	5
6	K591КН3	270	0,5	7,5	282,6	85	3
7	K590КН6	300	0,5	52,5	282,6	85	4
8	Н1506А-2	1200	0,5	7,5	108,7	125	5

$$P_p = (150 - T) / 0,23$$

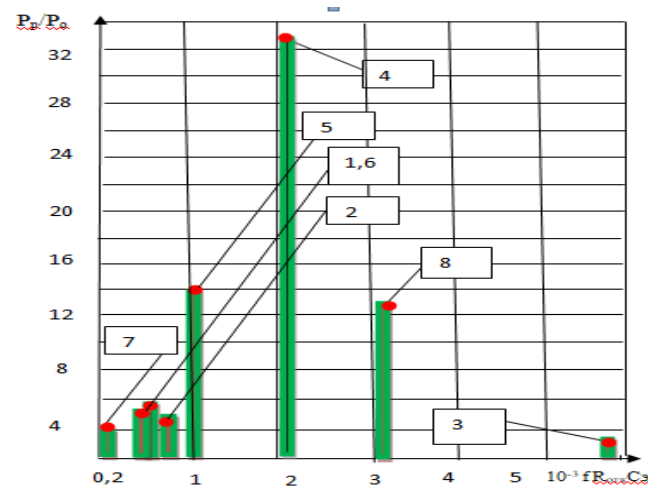


Рис. 14. Взаємозв'язок між параметрами  $P_p$ ;  $P_c$ ;  $f$ ;  $T$ ;  $C$ ;  $R$  скануючих пристроїв  
Цифри 1,...,8 відповідають табл. 6

Візуалізація взаємозв'язків між параметрами  $P_p$ ;  $P_c$ ;  $f$ ;  $T$ ;  $C$ ;  $R$  (рис. 14) підтвердила високу швидкість процедури вибору найкращого компонента за необхідним кількісним значенням КВРІ, а також визначення напрямку його вдосконалення. Наприклад, у пристрої Б1110КН1-2 є можливість збільшити частоту зчитування інформації за рахунок зменшення наявного великого енергетичного резерву. Це забезпечує створення швидкісної моделі та зменшує витрати більш ніж на 50 % порівняно з витратами на розробку нової моделі пристрою.

Безрозмірність величин КВРІ дає можливість їх синтезувати і, тим самим, об'єктивно оцінювати інформаційну систему в цілому, прикладом є: лазерний випромінювач, волоконний лазерний модуль, сканер, де результат записується наступним чином:

$$K_{\Sigma \text{ загал}} = K_{\Sigma \text{ лаз}} + K_{\Sigma \text{ л мод}} + K_{\Sigma \text{ скан}} = 12,1 + 3,28 + 34 = 49,38.$$

Отже, отримала подальший розвиток інформаційна технологія об'єктивного оцінювання компонентів через критерії видачі релевантної інформації, візуалізація яких при порівнянному аналізі прискорює процес апаратного забезпечення збору даних та створення спеціалізованої бази даних на відповідному підприємстві.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальну науково-технічну проблемну задачу підвищення ефективності управління процесом автоматизованого лазерного зварювання в умовах дії непередбачених факторів шляхом створення: спеціалізованих інформаційних баз знань на основі реляційних моделей параметрів режимів лазерного зварювання за результатами експериментів; металографічних зображень макро-, мікроструктур зварного шва і колошовної зони за результатами комп'ютерно-експериментального моделювання; спеціалізованої інформаційної бази даних за рахунок інформаційної технології об'єктивного оцінювання компонентів апаратного забезпечення збору даних і управління через формування коефіцієнтів видачі релевантної інформації (КВРІ) на прикладах лазерних випромінювачів, волоконних лазерних модулів, скануючих елементів для датчиків положення зварного стику тонкостінних конструкцій.

Основні наукові та практичні результати полягають у наступному:

- Вперше побудовано спеціалізовану інформаційну базу знань на основі реляційних моделей параметрів режимів лазерного зварювання металів за результатами експериментального дослідження шляхом встановлення інформаційних залежностей між цими параметрами за допомогою двох апроксимуючих функцій: гіперболічної та створених сплайн-функцій. Це дало можливість розробити графоаналітичний метод, за допомогою якого одночасно визначаються найкращі значення таких параметрів: ширини зварного шва, швидкості зварювання і потужності лазерного випромінювання в умовах дії непередбачених факторів. Крім того, апроксимуючі сплайн-функції при збереженні мають малий обсяг пам'яті і забезпечують легкість їх використання при аналізі та прогнозуванні.

- Вперше розширено спеціалізовану інформаційну базу знань шляхом створення реляційної моделі якісних металографічних зображень дрібнозернистих макро-, мікроструктур зварного шва та колошовної зони стикових з'єднань тонкостінних конструкцій в умовах дії непередбачених факторів через використання розробленого нового та вдосконалення методів управління кристалізацією імпульсами лазерного випромінювання складної форми. Трудомісткість полягає у створенні умов управління кристалізацією, які забезпечують зародження максимальної кількості центрів кристалізації з одночасною мінімізацією лінійної швидкості росту кристалів. Запропоновано три методи управління кристалізацією шляхом: додаткового теплового впливу на розплавлений метал, кер модулюючими імпульсами комбінованого лазерно-ультразвукового випромінювання через зміну їх частоти проходження, амплітуди та формування їх методом широтно-імпульсної модуляції, що створює в литому металі швів дрібнозернисту структуру на макро- і мікрорівнях та забезпечує високу експлуатаційну надійність через високі механічні властивості з'єднання тонкостінних конструкцій.

- Отримала подальший розвиток інформаційна технологія об'єктивного оцінювання багатопараметричних компонентів апаратного забезпечення збору даних (КАЗЗД) і управління при створенні спеціалізованої інформаційної бази даних через запропоновані критерії видачі релевантної інформації, особливість яких полягає у тому, що значення пріоритетності коефіцієнтів дорівнює одиниці. Візуалізація КВРІ при порівняльному аналізі прискорює процес вибору найкращих компонентів апаратного забезпечення збору даних і управління, а також процедуру створення спеціалізованої інформаційної бази даних на відповідному підприємстві. Верифікація підтверджена розрахунками синтезованих КВРІ на прикладах лазерних випромінювачів, волоконних лазерних модулів та скануючих елементів для датчиків положення зварного стику тонкостінних конструкцій.

- На стадії технологічної підготовки інформації використано створені спеціалізовані інформаційні бази знань і спеціалізовану інформаційну базу даних компонентів апаратного забезпечення збору даних при управлінні процесом автоматизованого лазерного зварювання тонкостінних конструкцій в умовах дії непередбачених факторів, що зменшує матеріальні, енергочасові витрати через зменшення витрат на відповідні попередні трудомісткі дослідження технологічної підготовки виробництва, особливо це відчутно при дрібносерійному виробництві; як наслідок, витрати зменшуються майже на 50 %.

- Враховуючи, що найбільш перспективними і найменш розвиненими є інформаційні технології аналізу в умовах дії непередбачених факторів визначення кращих параметрів режимів управління процесами автоматизованого лазерного зварювання тонкостінних конструкцій; методів управління кристалізацією на рівнях макро-, мікроструктур зварювальних швів і колошовних зон; компонентів апаратного забезпечення збору даних і управління, запропоновано збережену інформацію передавати розробнику зі спеціалізованих інформаційних баз знань і баз даних у вигляді графіків, гістограм, що забезпечує прискорення прийому інформації на 3, ..., 4 порядки.

- Сформульовано методику визначення кращих інформаційних параметрів режиму лазерного зварювання тонкостінних конструкцій для досягнення максимального значення використання потужності лазерного випромінювання, коефіцієнт ефективності якого становить 33 %.

- Створено схему відношень металографічних зображень зварного шва і частоти проходження модульованих лазерних імпульсів, яка забезпечує їх якісні структури на макро- і мікрорівнях. На прикладі зварювання конструкцій зі сталі марки 1,4541 і товщиною  $\delta=0,2$  мм за результатами експерименту визначено взаємозв'язок між значенням діапазону частоти проходження модульованих лазерних імпульсів з найкращим значенням, а саме: 2,0, ..., 3,0 кГц і розмірами аустенітного зерна  $\leq 3$  мкм. Це забезпечує підвищення пластичності та міцності зварного з'єднання тонкостінних конструкцій.

- Практичне значення результатів дослідження та розробок підтверджено актами та довідками про наукову значущість, практичне використання і можливість впровадження у виробництво в промисловості України та Молдови: «INSTITUTUL DE ENERGETIC ACADEMIA ȘTIINȚĂ MOLDOVEI» (Republic Moldova); довідка НБК «Фотоприлад» (м. Черкаси), а також теоретичні та практичні результати дослідження використовувалися в навчальному процесі у ЧДТУ на кафедрі робототехніки та спеціалізованих комп'ютерних систем.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

- [1] А. Г. Лукашенко, Д. А. Лукашенко, В. А. Лукашенко, Т. Ю. Уткина, и В. М. Лукашенко, *Методы, модели компьютерно-интегрированных систем управления специализированного лазерного технологического оборудования: монография*. Черкасы, Украина: Черкас. гос. технол. ун-т, 2016, библиогр.: 124 назв., рус., деп. в ГНТБ Украины 16.09.2016, № 12-Ук2016, анот. в РЖ «Депоновані наукові роботи», № 1-2, 2016.
- [2] В. М. Рудницький, Д. А. Гардер, І. А. Зубко, А. Г. Лукашенко, та В. М. Лукашенко, "Інформаційна технологія багатокритеріального кількісного об'єктивного оцінювання моделей волоконних лазерних модулів", *Nauka i studia, Przemysl*, № 5, pp. 39-45, 2021.
- [3] Д. А. Гардер, "Інформаційна технологія параметричної оптимізації режимів автоматизованого лазерного зварювання в умовах невизначеності", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 1, с. 133-143, 2021.
- [4] O. O. Grygor, E. E. Fedorov, T. Yu. Utkina, A. G. Lukashenko, K. S. Rudakov, D. A. Harder, and V. M. Lukashenko, "Optimization method based on the synthesis of clonal selection and

- annealing simulation algorithms", *Radio Electronics, Computer Science, Control*, vol. 2 (49), pp. 90-99, 2019, фахове видання, що входить до міжнародної наукометричної бази даних Thomson Reuters **Web of Science (WoS)**, ISSN 1607-3274 (print), ISSN 2313-688X (online). doi: 10.15588/1607-3274-2019-2-10.
- [5] D. A. Harder et al., "Bitwise method for the binarycoded operands conversion based on mathematical logic", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, no. 5/4 (95), pp. 6-14, 2018. doi: 10.15587/1729-4061.2018.142975, фахове видання, що входить до міжнародної наукометричної бази даних **Scopus**, ISSN 1729-3774.
- [6] А. Г. Лукашенко, С. Ф. Аксьонов, Д. А. Гардер, К. С. Рудаков, В. А. Лукашенко, Е. В. Воропай, та В. М. Лукашенко, "Метамодел ь обчислювача функції «квадратного кореня» спеціального призначення", *Наука і студія, Прzemysl*, № 11 (191), pp. 17-25, 2018.
- [7] D. A. Lukashenko et al., "The method for detecting energy reserve of components of computer-integrated systems", in *Proc. 14th Int. Conf. The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics – 2017 (CADSM 2017)*, Polyana, Svalyava, Zakarpattya, Ukraine, Feb. 21-25, 2017. Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2017, pp. 199-202, фахове видання, що входить до міжнародної наукометричної бази даних Thomson Reuters **Web of Science (WoS)**, ISSN 2572-7583, eISSN 2572-7591 (<https://tinyurl.com/vm6hqsk>).
- [8] А. Г. Лукашенко, І. А. Зубко, Д. А. Лукашенко, В. А. Лукашенко, та В. М. Лукашенко, "Модель багатофункціонального таблично-логічного співпроцесора для комп'ютерно-інтегрованих систем спеціального призначення", *Наука і студія, Прzemysl*, № 16 (177), pp. 32-38, 2017.
- [9] S. F. Aksyonov, A. G. Lukashenko, A. V. Havrysh, D. A. Lukashenko, V. A. Lukashenko, and V. M. Lukashenko, "Method for determining the best manufacturer of single-board computers", *Наука і студія, Прzemysl*, № 24-7 (161), pp. 16-20, 2016.
- [10] В. Д. Шелягін, А. Г. Лукашенко, В. Ю. Хаскін, Д. А. Лукашенко, та В. А. Лукашенко, "Розробка технології та обладнання автоматизованого лазерного зварювання для виготовлення деталей теплообмінників корабельних двигунів", *Наука та інновації. Науково-технічні інноваційні проекти Національної академії наук України*, т. 8, № 6, с. 34-39, 2014.
- [11] А. Г. Лукашенко, І. А. Зубко, В. М. Лукашенко, Д. А. Лукашенко, та В. А. Лукашенко, "Метод вибору системних плат для лазерного технологічного обладнання", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 3, с. 37-41, 2013.
- [12] Д. А. Лукашенко та ін., "Розробка обладнання та технології автоматизованого лазерного зварювання трубних компенсуючих елементів для авіакосмічної промисловості", *Наука та інновації. Науково-технічні інноваційні проекти Національної академії наук України*, т. 8, № 6, с. 53-59, 2012.
- [13] А. Г. Лукашенко, Т. В. Мельниченко, и Д. А. Лукашенко, "Лазерная сварка тонколистовой нержавеющей стали модулированным излучением", *Автоматическая сварка*, № 4, с. 19-23, 2012.
- [14] А. Г. Лукашенко, В. М. Лукашенко, Р. Е. Юпин, Д. А. Лукашенко, и В. А. Лукашенко, "Систематизация структур современных микроконтроллеров для лазерных технологических комплексов", *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвідомчий наук.-техн. зб.* Кіровоград: КНТУ, вип. 42, ч. 1, с. 95-99, 2012.
- [15] A. G. Lukashenko, V. M. Lukashenko, T. Yu. Utkina, D. A. Lukashenko, and V. A. Lukashenko, "Mathematical model of laser radiation configuration for obtaining fine-grained weld structure", *Современный научный вестник*, Белгород, № 11 (123), pp. 56-60, 2012.

- [16] A. G. Lukashenko, V. M. Lukashenko, T. Yu. Utkina, D. A. Lukashenko, and V. A. Lukashenko, "System analysis of connectivity components for information transfer in control systems of laser technological complex", *Nauka i studia, Przemysl*, № 11 (56), pp. 30-34, 2012.
- [17] A. G. Lukashenko, V. M. Lukashenko, T. Yu. Utkina, D. A. Lukashenko, and V. A. Lukashenko, "A technique for determination of dynamic parameters of feedback induction sensor", *Оралды ғылым жаршысы, Уральск*, №. 12 (48), pp. 92-99, 2012.
- [18] A. G. Lukashenko, T. Yu. Utkina, O. S. Verbjskij, D. A. Lukashenko, V. A. Lukashenko, and V. M. Lukashenko, "A sign model of the detection of the best finger-prints sensors for laser technological complex", *Nauka i studia, Przemysl*, №. 13 (58), pp. 78-83, 2012.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] А. Г. Лукашенко, Р. Е. Юпин, и Д. А. Лукашенко, "Алгоритмы расчета корректирующих констант при таблично-алгоритмических методах аппаратурной реализации функциональных зависимостей", *Вісник Хмельницького національного університету*, № 5, с. 190-194, 2011.
- [22] А. Г. Лукашенко, К. С. Рудаков, Р. Е. Юпин, та Д. А. Лукашенко, "Швидкодійний метод візуалізації вибору сучасних мікроконтролерів", *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, № 4/9 (52), с. 63-65, 2011.
- [23] А. Г. Лукашенко, К. С. Рудаков, Р. Е. Юпин, та Д. А. Лукашенко, "Методологія удосконалення моделі однокристалльного мікроконтролера", *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, № 5/9 (53), с. 51-54, 2011.
- [24] А. Г. Лукашенко, Д. А. Лукашенко, та С. А. Міценко, "Методологія організації бази даних на основі теорії неповної подібності та розмірностей", *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвідомчий наук.-техн. зб. Кіровоград: КНТУ, вип. 41, ч. 1, с. 336-339, 2011.*
- [25] А. Г. Лукашенко, Д. А. 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.
- [26] А. Г. Лукашенко, Д. А. Лукашенко, И. А. Зубко, В. А. Лукашенко, и В. М. Лукашенко, "Эффективный метод анализа сложных моделей и их компонентов для специализированного лазерного технологического комплекса", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 4, с. 42-47, 2011.
- [27] А. Г. Лукашенко, Д. А. Лукашенко, В. М. Лукашенко, М. Н. Озирская, и В. А. Лукашенко, "Физическая модель трехкоординатного технологического комплекса на базе CO<sub>2</sub>-Laser", *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. праць Кіровоград. нац. техн. ун-ту, Кіровоград: КНТУ, вип. 24, с. 77-82, 2011.*
- [28] А. Г. Лукашенко, Д. А. Лукашенко, В. А. Лукашенко, та В. М. Лукашенко, "Високонадійний багатofункціональний обчислювач для спеціалізованих лазерних технологічних комплексів", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 1, с. 67-70, 2011.
- [29] А. Г. Лукашенко, Д. А. Лукашенко, В. А. Лукашенко, и В. М. Лукашенко, "Экспериментальные исследования модели распределителя сигналов для

- пятикоординатного лазерного технологического комплекса", *Науковий вісник ЧНУ*, т. 2, вип. 3, с. 57-61, 2011.
- [30] Д.А.Лукашенко, М.А. Караван, Я.В. Корпань, и К.С. Рудаков, "Системный анализ формирования признаков для поиска информации в ассоциативных запоминающих устройствах", *Зб. наук. праць Кіровоградського національного технічного університету*. – Кіровоград: КНТУ, 2007. – вип. 19. – С. 227-230.
- [31] А. Г. Лукашенко, Д. А. Лукашенко, В. А. Лукашенко, и В. М. Лукашенко, "Модель эффективного цифроаналогового преобразователя для специализированных лазерных манипуляторов", *Вісник НТУУ "КПІ". Серія: Приладобудування*, № 40, с. 112-118, 2010.
- [32] A. G. Lukashenko, V. D. Shelyagin, D. A. Lukashenko, V. M. Lukashenko, M. N. Ozirskaja, and V. A. Lukashenko, "Three-coordinate laser technological complex on CO<sub>2</sub> basis", *Nauka i studia*, Przemysl, №. 8 (30), pp. 81-88, 2010.
- [33] Д.А. Лукашенко, В.Д. Шелягин, А.Г. Лукашенко, В.Ю.Хаскин, А.В. Бернацкий, А.В. Сиора та И.В. Шуба, "Разработка в области техники и технологи лазерной сварки, выполненные в ИЭС им. Е.О. Патона (Обзор)", *Автоматическая сварка: № 12 (770)*, с. 57-62, 2017.
- [34] А. Г. Лукашенко, В. Д. Шелягін, Д. А. Лукашенко, І. А. Зубко, та О. Ю. Талімончук, "Системний аналіз параметрів датчиків положення стику зварювальних деталей для лазерних технологічних комплексів", *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. праць Кіровоград. нац. техн. ун-ту*, Кіровоград: КНТУ, вип. 22, с. 211-217, 2009.
- [35] A. G. Lukashenko, V. M. Lukashenko, T. Yu. Utkina, D. A. Harder, and V. A. Lukashenko, "Synthesis of corrective and informational feedbacks for energy-saving precisional coprocessors", на *IX МНПК. Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій – 2018*, Запоріжжя, Україна, Жовт. 3-5, 2018. Запоріжжя: ЗНТУ, 2018, с. 75-76.
- [36] А. Г. Лукашенко, І. А. Зубко, С. Ф. Аксенов, Д. А. Гардер, С. А. Миценко, В. А. Лукашенко, и В. М. Лукашенко, "Образно-знаковая модель кусочно-линейного аппроксиматора специального назначения", in *Proc. XIV Mezinárodní vědecko-praktická konf. Dny Vědy – 2018*, Praha, Břez. 22-30, 2018. Praha: Education and Science, 2018, vol. 6, с. 63-65.
- [37] В. В. Корнух, А. Г. Лукашенко, І. А. Зубко, В. А. Лукашенко, Д. А. Лукашенко, та В. М. Лукашенко, "Структурований метод якісної оцінки багатопараметричних співпроцесорів", in *Proc. XIII Int. Sci. and Pract. Conf. Science without borders – 2017*, Sheffield, England, Mar. 30-Apr. 7, 2017. Sheffield: Science and Education Ltd, 2017, vol. 12, pp. 3-8.
- [38] В. А. Лукашенко, А. Г. Лукашенко, Р. Я. Романович, та Д. А. Лукашенко, "Модель якісної оцінки фірм виробників сопроцесорів", на *II МНПК Інформаційні технології та взаємодії – 2015*, Київ, Україна, листоп. 3-5, 2015. Київ: НТУУ "КПІ", 2015, с. 214-216.
- [39] В. М. Лукашенко, А. Г. Лукашенко, Т. Ю. Уткина, Д. А. Лукашенко, и В. А. Лукашенко, "Методика оптимизации параметров компонентов микропроцессорных систем", на *IX МНПК Настоящи изследвания и развитие – 2013*, София, Болгария, яну. 17-25, 2013. Софія: Бял ГРАД-БГ ООД, 2013, т. 27, с. 48-51.
- [40] А. Г. Лукашенко, В. М. Лукашенко, Р. Е. Юпин, Д. А. Лукашенко, и В. А. Лукашенко, "Классификация современных микроконтроллеров для лазерных технологических комплексов", in *Proc. VIII Mezinárodní vědecko-praktická konf. Aktuální vzmoženosti vědy – 2012*, Praha, čer. 27-červ. 5, 2012. Praha: Education and Science, 2012, т. 20, с. 45-48.
- [41] А. Г. Лукашенко, В. А. Лукашенко, В. М. Лукашенко, Т. Ю. Уткина, Д. А. Лукашенко, и А. С. Лихолай, "Методы прогрессивных технологий, обеспечивающих мелкозернистую структуру сварочного шва", на

- VШМНПК Новината за напреднали наука – 2012*, София, Болгария, мая 17-25, 2012. София: Бял. ГРАД-БГ ООД, 2012, т. 24, с. 3-8.
- [42] А. Г. Лукашенко, Я. В. Корпань, В. М. Лукашенко, та Д. А. Лукашенко, "Табличний логічно-оборотний метод апаратної реалізації спеціалізованого кодоперетворювача", in *Proc. V Mezinárodní vědecko-praktická konf. Vědecký pokrok na rozmezí millennium – 2009*, Praha, Чехія, květ. 27-čer. 5, 2009. Praha: Education and Science, 2009, т. 15, с. 45-48.
- [43] А. Г. Лукашенко, О. О. Григор, Д. А. Гардер, К. С. Рудаков, С. А. Міценко, В. А. Лукашенко, М. В. Чичужко, Є. Є. Федоров, та В. М. Лукашенко, "Формувач функцій в двійково-кодованих системах числення", *МПК (2021.01) G 06F 5/01, G 06F 7/552, G 06G 7/06, G 06G 7/20*. Пат. на винахід UA 123028 C2 Україна, № а 2019 04980, заявл. Трав. 10, 2019, опубл. Лют. 03, 2021, Бюл. № 5.
- [44] А. Г. Лукашенко, О. О. Григор, Д. А. Гардер, К. С. Рудаков, С. А. Міценко, В. А. Лукашенко, Є. Є. Федоров, та В. М. Лукашенко, "Гібридний багатофункціональний обчислювальний пристрій", *МПК (2020.01) G 06F 5/00, G 06G 7/12, G 06J 3/00, H 03M 1/66, H 03M 1/78, H 03M 5/00, H 03M 7/00*. Пат. на винахід 121939 Україна, № а 2019 02341; заявл. Берез. 11, 2019, опубл. Серп. 10, 2020, Бюл. № 15.
- [45] А. Г. Лукашенко, Д. А. Лукашенко, С. Ф. Аксьонов, В. А. Лукашенко, та В. М. Лукашенко, "Формувач функції "Корінь квадратний" в двійково-кодованих системах числення", *МПК (2019.01) G 06F 5/00*. Пат. на винахід 119006 C2 Україна, № а 2017 10151, заявл. Жовт. 20, 2017, опубл. Квіт. 10, 2019, Бюл. № 7.
- [46] А. Г. Лукашенко, Д. А. Лукашенко, Т. Ю. Уткіна, В. А. Лукашенко, та В. М. Лукашенко, "Цифроаналоговий перетворювач", *МПК (2017.01) H 03M 1/66, H 03M 1/00*. Пат. на винахід UA 115415 C2 Україна, № а 2016 12043, заявл. Листоп. 28, 2016, опубл. Жовт. 25, 2017, Бюл. № 20.
- [47] В. А. Лукашенко, А. Г. Лукашенко, І. А. Зубко, Д. А. Лукашенко, В. М. Лукашенко, та К. С. Рудаков, "Співпроцесор для обчислення значень "прямих" та "обернених" функцій", *МПК (2016.01) G 06F 5/00, G 06F 7/00, G 06F 9/00, H 03K 19/003*. Пат. на винахід 111808 Україна, № а 2015 10690, заявл. Листоп. 2, 2015, опубл. Черв. 10, 2016, Бюл. № 11.
- [48] В. А. Лукашенко, А. Г. Лукашенко, І. А. Зубко, Д. А. Лукашенко, та В. М. Лукашенко, "Багатофункціональний таблично-логічний співпроцесор", *МПК (2016.01) G 06F 5/00, G 06F 7/00, G 06F 9/00, H 03K 19/00*. Пат. на винахід 111459 Україна, № а 2015 09351, заявл. Верес. 28, 2015, опубл. Квіт. 25, 2016, Бюл. № 8.
- [49] А. Г. Лукашенко, В. М. Лукашенко, І. А. Зубко, Д. А. Лукашенко, та В. А. Лукашенко, "Перетворювач двійкового коду в однополярні оборотні коди і навпаки", *МПК (2015.01) G 06F 5/00, H 03M 5/00, H 03M 7/00*. Пат. на винахід 107544 Україна, № а 2014 01392, заявл. Лют. 12, 2014, опубл. Січ. 12, 2015, Бюл. № 1.
- [50] В. Д. Шелягін, А. Г. Лукашенко, Д. А. Лукашенко, В. А. Лукашенко, та В. Ю. Хаскін, "Спосіб лазерного зварювання з широтно-імпульсною модуляцією випромінювання", *МПК (2014.01) B 23K 26/21*. Пат. на винахід 109328 C2 Україна, № а 2013 14855, заявл. Груд. 18, 2013, опубл. Серп. 10, 2015, Бюл. № 15.
- [51] В. Д. Шелягін, А. Г. Лукашенко, Д. А. Лукашенко, В. Ю. Хаскін, О. В. Сіора, та А. В. Бернацький, "Спосіб лазерного зварювання", *МПК (2012.01) B 23K 26/00*. Пат. на винахід 68159 Україна, № а 2011 13985, заявл. Листоп. 28, 2011, опубл. Берез. 12, 2012, Бюл. № 5.

## АНОТАЦІЯ

**Гардер Д. А. Інформаційна технологія прийняття рішень для управління автоматизованим лазерним зварюванням тонкостінних конструкцій.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.06 – інформаційні технології. – Черкаський державний технологічний університет, Україна, Черкаси, 2021.

Робота присвячена підвищенню ефективності управління процесом автоматизованого лазерного зварювання в умовах дії непередбачених факторів шляхом створення: спеціалізованих інформаційних баз знань на основі реляційних відношень параметрів режимів лазерного зварювання за результатами експериментів; металографічних зображень макро-, мікроструктур зварного шва і колошовної зони за результатами комп'ютерно-експериментального моделювання; інформаційної технології об'єктивного оцінювання компонентів апаратного забезпечення збору даних і управління через формування коефіцієнтів видачі релевантної інформації (КВРІ). Їх особливість полягає в тому, що значення пріоритетних коефіцієнтів дорівнюють одиниці, що при створенні спеціалізованої інформаційної бази даних високоякісних елементів, модулів, пристроїв тощо зменшує енергетичні, часові, просторові і матеріальні витрати. Крім того, синтез безрозмірних КВРІ забезпечує об'єктивне оцінювання ефективності технологічних лазерних комплексів у цілому. Це показано на прикладах синтезованих КВРІ лазерних випромінювачів, волоконних лазерних модулів, скануючих елементів датчиків положення зварного стику тонкостінних конструкцій. Ефективність інформаційних технологій обґрунтовано теоретично і підтверджено розрахунками та експериментами. Основні теоретичні та практичні результати досліджень впроваджено в низці підприємств і державному університеті України.

Ключові слова: інформаційні технології, сплайн-функції, апроксимація, автоматизоване управління, критерії видачі релевантної інформації, реляційна модель.

## АННОТАЦИЯ

**Гардер Д. А. Информационная технология принятия решений для управления автоматизированной лазерной сваркой тонкостенных конструкций. – На правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06 – информационные технологии. – Черкасский государственный технологический университет, Украина, Черкассы, 2021.

Работа посвящена повышению эффективности управления процессом автоматизированной лазерной сварки в условиях действия непредвиденных факторов за счет создания: специализированных информационных баз знаний на основе реляционных отношений параметров режимов лазерной сварки по результатам экспериментов; металлографических изображений макро-, микроструктур сварного шва и околошовной зоны по результатам компьютерно-экспериментального моделирования; информационной технологии объективного оценивания компонентов апаратного обеспечения сбора данных и управления через формирование коэффициентов выдачи релевантной информации (КВРИ). Их особенность заключается в том, что значения приоритетных коэффициентов равны единицы. Это при создании специализированной информационной базы данных с высококачественными показателями элементов, модулей, устройств и др. уменьшает энергетические, временные, пространственные и материальные затраты. Кроме того, синтез безразмерных КВРИ обеспечивает объективное оценивание эффективности технологических лазерных комплексов в целом. Это показано на примерах синтезированных КВРИ лазерных излучателей,



волоконных лазерных модулей, сканирующих элементов датчиков положения сварного стыка тонкостенных конструкций. Эффективность информационных технологий обоснована теоретически и подтверждена расчетами, экспериментами. Основные теоретические и практические результаты исследования внедрены в ряде предприятий и в государственном университете Украины.

Ключевые слова: информационные технологии, аппроксимация, автоматизированное управление, критерии выдачи релевантной информации, реляционная модель.

## ABSTRACT

**Harder D. A. Information technology of decision-making for the control of automated laser welding of thin-walled structures.** – As a manuscript.

In the dissertation work the actual scientific and technical problem of the increase of efficiency for the control of automated laser welding process under conditions of unforeseen factors by the creation of: specialized information bases of knowledge on the basis of relations of parameters of laser welding modes by experimental results; metallographic images of macro-, microstructures of the weld and the seam zone according to the results of computer-experimental modeling; specialized information database due to information technology of objective evaluation of hardware components of data collection and control through the formation of coefficients for issuing relevant information (CIRI) on the examples of laser emitters, fiber laser modules, scanning elements of weld joint position sensors of thin-walled structures is solved.

For the first time, a specialized information base of knowledge based on relations of parameters of metals laser welding modes after the results of experimental research by establishing information dependences between these parameters, using two approximating functions: hyperbolic and created spline functions, is built. This provides an opportunity to develop a graph-analytical method, which simultaneously determines the best values of the following parameters: the width of the weld, the welding speed and the power of laser radiation under conditions of unforeseen factors. In addition, approximating spline functions have a small amount of memory when stored and provide the ease of their use in analysis and forecasting.

For the first time, a specialized information base of knowledge has been expanded by creating high-quality metallographic images of fine-grained macro-, microstructures of welds and the seam zone of butt joints of thin-walled structures under conditions of unforeseen factors through the use of developed new and improved methods of crystallization control by laser radiation pulses of complex shape. The complexity is to create conditions for crystallization control, which ensure the emergence of the maximum number of crystallization centers while minimizing the linear growth rate of crystals. Three methods of crystallization control are proposed: by additional thermal effect on molten metal, the control of modulating pulses of combined laser-ultrasonic radiation due to the change of their frequency, amplitude and their formation by pulse-width modulation method, which creates a fine-grained structure in cast metal of the seams at the macro- and microlevels and provides high operational reliability due to high mechanical properties of connection of thin-walled structures.

The information technology for objective estimation of multiparametric components of data collection hardware (CDCH) and control in creating a specialized information database

through the proposed criteria for issuing relevant information (CIRI), the peculiarity of which is that the value of the priority of coefficients (penalty functions, et etc.) is equal to one, has received the further development. The visualization of CIRI at the comparative analysis accelerates the process of a choice of the best hardware components of data collection and control, and also the procedure of creation of the specialized information database at the corresponding enterprise. The verification is confirmed by calculations of the synthesized CIRIs on the examples of laser emitters, fiber modules and scanning elements of weld joint position sensors of thin-walled structures.

The use of specialized information base of knowledge (mathematical models, generalized criteria for issuing relevant information) and CDCH database, which are used at the stage of technological preparation of information to control the process of automated laser welding of thin-walled structures under conditions of unforeseen factors, reduces material and energy time costs due to the reduction of costs for the corresponding preliminary labor-intensive research of manufacture technological preparation, this is especially noticeable in small-scale production and, as a result, expenses decrease by almost 50 %.

Given that the most promising and the least developed are information technologies of analysis under conditions of unforeseen factors to determine the best: control modes of the processes of automated laser welding of thin-walled structures; crystallization control methods at the levels of macro-, microstructures of welds and seam zones; hardware components for data collection and control, it is proposed to transfer the stored information to the developer from specialized information databases and data in the form of graphs, histograms, which accelerates the reception of information by 3, ..., 4 orders.

The method for determining the best information parameters of the mode of laser welding of thin-walled structures to achieve the maximum value of the use of laser radiation power, the efficiency of which is 33%, is formulated.

The scheme of relations of metallographic weld images and the frequency of modulated laser pulses which provides their qualitative structures at macro- and microlevels is created. On the example of welding of steel structures of grade 1.4541 and thickness  $\delta=0.2$  mm, the results of the experiment determine the relationship between the value of frequency range of modulated laser pulses and the best value, namely: 2.0 ..., 3.0 kHz, while the size of austenitic grain is about 3 3 microns. This increases the ductility and strength of the welded joint of thin-walled structures.

Practical significance of the results of research and developments is confirmed by acts and certificates on scientific significance, practical use and possibility of introduction into production in the industry of Ukraine and Moldova: "INSTITUTUL DE ENERGETIC ACADEMIA ȘTIINȚĂ MOLDOVEI" (Republic of Moldova); certificate of the Research and Production Complex "Fotoprylad" (Cherkasy), also theoretical and practical results of the study have been used in the educational process at ChSTU at the Department of Robotics and Specialized Computer Systems.

Keywords: information technologies, spline functions, approximation, automated control, criteria for issuing relevant information, relational model.