

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЧЕРКАСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ГАРДЕР ДМИТРО АНДРІЙОВИЧ

УДК 004.383

ДИСЕРТАЦІЯ

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

Спеціальність 05.13.06 – Інформаційні технології

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____Д.А. Гардер

Науковий керівник **Рудницький Володимир Миколайович**
доктор технічних наук, професор

Черкаси – 2021

АНОТАЦІЯ

Гардер Д. А. «Інформаційна технологія прийняття рішень для управління автоматизованим лазерним зварюванням тонкостінних конструкцій».

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

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 (KBPI) на прикладах лазерних випромінювачів, волоконних лазерних модулів, скануючих елементів для датчиків положення зварного стику тонкостінних конструкцій.

- У *першому розділі* проведено аналіз інформаційного забезпечення процесу прийняття рішень для управління автоматизованим лазерним зварюванням тонкостінних конструкцій. З проведеного аналізу наявних інформаційних технологій визначено перелік недоліків, що впливають на ефективність роботи.

До головних із них відносяться:

- енергочасові та матеріальні витрати на отримання додаткової інформації при підборі значень параметрів режимів в умовах обмеженого часу та при дрібносерійному випуску продукції;

- низька інформативність макро-, мікроструктур зварних швів та колошовних зон, що негативно впливає на якість виробу, а отримання додаткової інформації – на вартість виробу;

- низька ефективність через тривалість часу на вибір багатопараметричних компонентів апаратного забезпечення збору даних у зв'язку з їх суб'єктивним оцінюванням.

- У *другому розділі* 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.

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 %.

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

- У *третьому розділі* 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, керування 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.

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 ≤ 3 мкм. Це забезпечує підвищення пластичності та міцності зварного з'єднання тонкостінних конструкцій.

- У *четвертому розділі* 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 (штрафних функцій та ін.) 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.

Враховуючи, що найбільш перспективними і найменш розвиненими є інформаційні технології аналізу в умовах дії непередбачених факторів визначення найкращих 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.

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

ABSTRACT

Harder D. A. Information technology of decision-making for the control of automated laser welding of thin-walled structures.

Thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences, specialty 05.13.06 – "Information Technology". – Cherkasy State Technological University, Cherkasy, 2021.

In the dissertation 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 relational models 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 for weld joint position sensors of thin-walled structures has been solved.

- The **first section** analyzes the information support of the decision-making process for the control of automated laser welding of thin-walled structures. From the analysis of available information technologies the list of drawbacks that affect the efficiency of work is defined.

The main drawbacks are:

- energy, time and material costs to obtain additional information in the selection of values of mode parameters in a limited time and in small-scale production;

- low informativeness of macro-, microstructures of welds and seam zones, which negatively affects the quality of the product, and obtaining of additional information – on the cost of the product;

- low efficiency due to the length of time for the selection of multi-parameter components of data collection hardware in connection with their subjective evaluation.

- The **second section** builds a specialized information base of knowledge based on relational models of parameters of metals laser welding modes based on the results of experimental research by establishing information relationships between these parameters using two approximating functions: hyperbolic and created spline functions. This made it possible 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.

At the stage of technological preparation of information the created specialized information bases of knowledge and the specialized information database of components of data collection hardware at the control of the process of automated laser welding of thin-walled structures under conditions of unforeseen factors are used, which reduces material, energy and time costs by reducing the cost of relevant preliminary labor-intensive studies of technological preparation of production, especially in small-scale production; as a result, costs are reduced by almost 50%.

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 **third section** expands the specialized information base of knowledge by creating a relational model of 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 macro- and microlevels and provides high operational reliability due to high mechanical properties of connection of thin-walled structures.

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 $3 \mu\text{m}$. This increases the ductility and strength of the welded joint of thin-walled structures.

- In the ***fourth section*** 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 synthesized CIRIs on the examples of laser emitters, fiber laser modules and scanning elements for weld joint position sensors of thin-walled structures.

Given that the most promising and the least developed are information technologies of analysis under conditions of unforeseen factors to determine the

best parameters of control modes of automated laser welding processes 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.

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

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. Черкассы, 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 binary-coded 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, "Метамоделювання функції «квадратного кореня» спеціального призначення", *Nauka i studia, Przemysl*, № 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, Zakarpattia, 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", *Nauka i studia, Przemysl*, № 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", *Nauka i studia, Przemysl*, № 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*, Przemyśl, №. 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 аппаратной реализации функциональных зависимостей", *Вісник Хмельницького національного університету*, № 5, с. 190-194, 2011.
- [22] А. Г. Лукашенко, К. С. Рудаков, Р. Є. Юпин, та Д. А. Лукашенко, "Швидкодіючий 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. Є. 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 CO₂-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 багатофункціональний 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] А. Г. Лукашенко, "Модель каскадов управления транзисторными переключателями в лазерных комплексах", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 3, с. 21-25, 2011.

- [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 CO₂ basis", *Nauka i studia, Przemysl*, №. 8 (30), pp. 81-88, 2010.
- [33] А. Г. Лукашенко, О. А. Кулигін, та В. М. Лукашенко, "Виявлення резерву предмета дослідження на основі теорії неповної подібності та розмірностей", *Вісник Хмельницького національного університету*, № 3, с. 184-187, 2009.
- [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, И. 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 *ІІ 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 *ІХ МНПК Настоящи изследвания и развитие – 2013*, София, Болгария, яну. 17-25, 2013. София: 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 *VIII МНПК 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,*

Н 03К 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, Н 03М 5/00, Н 03М 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) В 23К 26/21. Пат. на винахід 109328 С2 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) В23К 26/00. Пат. на винахід 68159 Україна, № а 2011 13985, заявл. Листоп. 28, 2011, опубл. Берез. 12, 2012, Бюл. № 5.*

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	6
ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. СТАН ПРЕДМЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ФОРМУВАННЯ ЗАВДАННЯ.....	14
1.1 Основні поняття інформаційної системи, інформаційних ресурсів, інформаційної технології та основні вимоги до баз знань і даних.....	14
1.2 Інформаційний аналіз технологій про особливості лазерного зварювання тонкостінних конструкцій.....	16
1.3 Аналіз сфери застосування лазерного зварювання тонкостінних конструкцій.....	18
1.4 Аналіз сфери застосування лазерного зварювання тонкостінних конструкцій.....	20
1.5 Аналіз компонентів зв'язку для передачі відповідної інформації.....	22
1.6 Аналіз впливу температури на кристалізацію структури зварного шва	25
1.7 Аналіз наявних інформаційних технологій оцінювання багатопараметричних компонентів апаратного забезпечення збору даних.....	30
1.8 Формулювання основних завдань наукового дослідження.....	33
Висновки до розділу 1	34
Список використаних джерел	35
РОЗДІЛ 2 СПЕЦІАЛІЗОВАНА БАЗА ЗНАНЬ ЧЕРЕЗ РЕЛЯЦІЙНІ МОДЕЛІ ПАРАМЕТРІВ РЕЖИМІВ ЗВАРЮВАННЯ ПРИ ДІЇ НЕПЕРЕДБАЧЕНИХ ФАКТОРІВ.....	45

2.1 Реляційні моделі основних параметрів режимів лазерного зварювання за результатами експериментів	46
2.2 Графічне представлення залежностей визначених параметрів режимів лазерного зварювання та визначення апроксимуючих функцій.....	50
2.2.1 Дослідження результатів експериментів, що апроксимовані гіперболічною функцією.....	51
2.2.2 Методика визначення кращих параметрів режиму лазерного зварювання в умовах дії непередбачених факторів.....	55
2.3 Дослідження результатів експериментів, що апроксимовані створеними сплайн-функціями	56
2.4 Графоаналітичні методи визначення кращих параметрів режимів для автоматизованого лазерного зварювання в умовах дії непередбачених факторів в умовах дії непередбачених факторів.....	64
2.4.1 Графоаналітичний метод побудови знакових моделей в єдиному квадранті.....	64
2.4.2 Графоаналітичний метод побудови знакових моделей за двома квадрантами.....	68
2.5 Верифікація відповідності між експериментальними даними та математичними моделями	71
Висновки до розділу 2.....	75
Список використаних джерел	77
РОЗДІЛ 3 УДОСКОНАЛЕННЯ БАЗИ ЗНАНЬ ЧЕРЕЗ СХЕМИ ВІДНОШЕНЬ МЕТОДІВ УПРАВЛІННЯ КРИСТАЛІЗАЦІЄЮ МЕТАЛУ ТА ЗОБРАЖЕНЬ ЙОГО МІКРОСТРУКТУРИ	79
3.1 Основні показники якісного оцінювання з'єднання тонкостінних конструкцій.....	80

3.2 Методи управління кристалізацією литого металу та його схеми відношень зображень мікроструктури.....	80
3.2.1 Перший метод управління кристалізацією литого металу та відображення макро-, мікроструктур зварного шва колошовної зони.....	81
3.2.1.1 Програма та методика зварювання тонкостінних конструкцій	83
3.2.1.2 Аналіз зображень макроструктурних рівнів за результатами комп'ютерно-експериментального моделювання.....	88
3.2.1.3 Аналіз зображень мікроструктурних рівнів за результатами комп'ютерно-експериментального моделювання.....	91
3.2.3 Аналіз зображень розподілення основних компонентів та мікротвердості за результатами комп'ютерно-експериментального моделювання.....	99
3.2.4 Другий метод управління кристалізацією литого металу та відображення макро-, мікроструктур зварного шва колошовної зони.....	104
3.2.5 Третій метод управління кристалізацією литого металу та відображення макро-, мікроструктур зварного шва, колошовної зони.....	105
Висновки до розділу 3.....	107
Список використаних джерел.....	109
РОЗДІЛ 4 ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ОБ'ЄКТИВНОГО ОЦІНЮВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ КОМПОНЕНТІВ ДЛЯ АНАЛІЗУ ТА СИНТЕЗУ.....	112
4.1 Основні операції інформаційної технології об'єктивного оцінювання багатопараметричних компонентів.....	113
4.2 Системний аналіз датчиків положення стику з'єднаних тонкостінних конструкцій	114

4.3 Дослідження існуючих компонентів апаратного забезпечення інформаційної системи збору даних і управління.....	121
4.3.1 Дослідження множини існуючих лазерних випромінювачів та визначення кращого типу.....	121
4.3.2 Дослідження множини існуючих скануючих пристроїв та визначення кращого типу.....	127
4.3.3 Дослідження множини волоконних лазерних модулів та визначення кращого типу.....	130
Висновки до розділу 4.....	137
Список використаних джерел.....	138
ВИСНОВКИ.....	143
ДОДАТКИ.....	147

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АЛЗ – автоматизоване лазерне зварювання

АЛТ – автоматизований лазерний технологічний комплекс

БД – база даних

ІС – інтегральні схеми

КАЗЗД – компоненти апаратного забезпечення збору даних

КВРІ – коефіцієнт видачі релевантної інформації

ККД – коефіцієнт корисної дії

КЛА – кусково-лінійна апроксимація

ЛШРК – лінійна швидкість росту кристалів

ММ – математична модель

ПЗС – прилади з зарядовим зв'язком

ЦК – центри кристалізації

ВСТУП

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. N. Manyam, 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 (KBPI) 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. Відмітною особливістю 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 на основі реляційних моделей якісних металографічних зображень дрібнозернистих макро-, мікроструктур зварного шва, колошовної зони стикових з'єднань тонкостінних конструкцій і трьох розроблених методів управління кристалізацією розплавленого металу, які відзначаються тим, що модулюючи імпульси складної форми комбінованого лазерно-ультразвукового випромінювання додатково роблять тепловий вплив на розплав металу методами, які змінюють або частоту їх проходження, або амплітуду, або формують їх методом широтно-імпульсної модуляції.

3. Візуалізація отриманої інформації забезпечує високу швидкість її прийому, а легкість досягнути суті інформації зменшує час на її освоєння.

4. Отримала подальший розвиток інформаційна технологія об'єктивного оцінювання багатопараметричних компонентів апаратного забезпечення збору даних. Відмітною особливістю є створення багатопараметричних критеріїв видачі релевантної інформації (КВРІ), водночас значення пріоритетності коефіцієнтів (штрафних функцій та ін.)

дорівнює одиниці. Це 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. Це 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 методику 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 ≤ 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 НБК «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 IX 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.); IX МНПК «Настоящи изследвания и развитие – 2013», (Софія, Болгария, яну. 17–25, 2013); VIII MVPK “Aktuální vzmoženosti vědy – 2012”, (Praha, čer. 27–červ. 5, 2012); VIII МНПК «Новината за напреднали наука – 2012», (Софія, Болгария, мая 17–25, 2012); V MVPK “Vědecký pokrok na rozmezí millennium – 2009”, (Praha, Чехия, 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.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПРЕДМЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ФОРМУВАННЯ ЗАВДАННЯ

У першому розділі:

- проаналізовано інформацію про особливості технологій при лазерному зварюванні тонкостінних конструкцій;
- проведено аналіз інформаційних технологій управління процесом кристалізації литого металу;
- проведено аналіз інформаційного забезпечення процесу прийняття рішень для управління автоматизованим лазерним зварюванням тонкостінних конструкцій в умовах дії непередбачених факторів;
- сформульовано завдання дослідження.

1.2 Основні поняття інформаційної системи, інформаційних ресурсів, інформаційної технології та основні вимоги до баз знань і даних

Відомо, що інформаційні системи і технології сприяють розвитку суспільства, будучи одним із напрямів науково-технічного прогресу.

Інформаційні системи – системи обробки інформації для будь-якої предметної області із засобами накопичення, зберігання, поновлення, пошуку і видачі інформації [70, 71].

Інформаційні ресурси – бази даних, бази знань, що отримані або експериментально, або комп'ютерно-експериментальним моделюванням, або іншими методами, накопичуються в процесі розвитку науки і практичної діяльності людей та використовуються у виробництві й управлінні [70, 71].

Під інформаційною технологією прийнято розуміти метод і його реалізацію для відбору, передачі, зберігання та обробки інформативних параметрів з метою отримання ефективного управління [70–73]

технологічними процесами, наприклад процесом автоматизованого лазерного зварювання тонкостінних конструкцій.

Вимоги до бази знань – сукупність систематизованої основної інформації відповідної галузі знання, що зберігається, водночас об'єм пам'яті повинен бути малим, але достатнім для вирішення заданого кола теоретичних або практичних завдань та забезпечувати легкість освоєння [70].

Вимоги до бази даних – збереження інтегрованих і колективно використовуваних даних при забезпеченні мінімального об'єму пам'яті і швидкого доступу [70, 71].

1.4 Інформаційний аналіз технологій про особливості лазерного зварювання тонкостінних конструкцій

Відомо [37–39, 49, 50, 52–55], що лазерне зварювання є одним із прогресивних і сучасних технологічних процесів.

Лазерні технології дають можливість:

- підвищити якість;
- підвищити продуктивність;
- знизити собівартість;
- забезпечити екологічну чистоту виробництва;
- забезпечити з'єднання з багатьох однорідних і різнорідних металів [1–4, 6, 8, 27–29, 48, 67–69].

Інформаційним питанням про лазерні технології присвячено низку робіт: А. А. Аграновича, Е. А. Валдайцевої, С. Г. Гірського, А. Г. Григор'янц, В. М. Домененко, Е. В. Землякова, І. В. Кривцун, Є. П. Малкіна, А. І. Місюрова, Е. А. Нормана, Г. А. Турічин, І. М. Шіганова, К. В. Юдіна та ін. [1–4, 6, 10–16].

На основі аналізу і синтезу інформаційних результатів їх робіт виявлено, що для технологічного процесу лазерного зварювання стикових з'єднань характерними особливостями є наступні:

1. Для отримання симетричного зварного шва необхідно, щоб теплофізичні властивості зварюваних металів були подібними, а фокусування плями нагріву було спрямовано на стик з'єднання.

2. При зварюванні встик, коли один зі зварюваних металів є більш тугоплавким, використовується схема, в якій пляма нагріву зміщується в бік більш тугоплавкого металу. В результаті відбувається нагрів і плавлення більш тугоплавкого металу, а менш тугоплавкий метал плавиться за рахунок теплоти, що передається його кромці від розплаву.

3. Імпульсне лазерне зварювання стикових з'єднань вимагає ретельної підгонки кромки зварювальних деталей. Необхідно забезпечити відсутність скосу і пошкоджень кромки. В іншому випадку шов вийде ослабленим (в результаті відсутності додаткового матеріалу) або при надмірно великому зазорі кромки оплавляються без утворення спільної зварювальної ванни.

4. Кількість енергії, що поглинається металом при лазерному зварюванні, залежить від стану поверхні. Поглинання енергії зростає з погіршенням обробки деталей. Цей вплив є істотним і має враховуватися при виборі режимів зварювання тонких деталей. Так, наприклад, при зварюванні стикових з'єднань з тонкостінного металу необхідно забезпечити однакову чистоту обробки крайок по всій довжині шва, щоб попередити виплеск або непровари [5–6].

5. Застосування захисної атмосфери (аргону) сприяє зменшенню кількості та розмірів мікротріщин.

6. Зі збільшенням температури рідкого металу і площі його зіткнення зі зварювальною атмосферою зростає концентрація поглинених їм газів. У деяких випадках це сприяє утворенню міжкристалічних мікротріщин і підвищенню крихкості металу шва [1, 6, 7].

Знання цих особливостей сприяє підвищенню якості виробу через їх використання.

1.5 Аналіз сфери застосування лазерного зварювання тонкостінних конструкцій

За кордоном останнім часом інформація про застосування технології лазерного зварювання стикових з'єднань з нержавіючих сталей малої товщини знаходить все більш широке застосування при виготовленні відповідальних зварних конструкцій у багатьох галузях промисловості, витісняючи, таким чином, названі конкуруючі технології [8–11, 64–66].

Порівняно з іншими процесами, вона має істотні переваги, основними з яких є:

- відсутність необхідності в застосуванні складних вакуумних камер;
- забезпечення малих розмірів зони термічного впливу;
- забезпечення мінімальних залишкових термічних деформацій.

Ця технологія сприяє розвитку пріоритетних галузей промисловості:

- ракетної;
- космічної;
- авіаційної;
- суднобудування;
- приладобудування;
- медицини та інших.

Постійно зростає потреба в прецизійних з'єднаннях малих розмірів, вимоги до якості яких з кожним роком підвищуються [1, 32].

Найбільш затребуваним нині є такий сортамент прецизійних труб: зовнішній діаметр – менший 40 мм аж до 0,1 мм (з мінімальною товщиною стінки до 0,017 мм) з широкого спектра матеріалів [31–35].

Останнім часом з'явилося багато публікацій, в яких наведено приклади створення лазерних комплексів [9, 29–31].

В роботах [10, 11] представлено компактні конструкції лазерних мобільних установок для зварювання листів з конструкційної та нержавіючої сталей і титану. Лазерним випромінюванням керує мікроконтролер. При зміні швидкості переміщення виробляється коректування потужності лазерного пучка, що сприяє одержанню зварного з'єднання необхідної якості, наприклад, переносні апарати LHS G-1 [12], LHS G-2 [13], що призначені для лазерного зварювання коротких стикових з'єднань і таврових з'єднань. Ці конструкції характеризуються простотою керування процесом лазерного зварювання й економічністю, але робочий інструмент переміщується вручну. Параметри режиму зварювання задаються спеціальною програмою.

У зварювальному учбовому дослідницькому центрі (Галле, Німеччина) розроблено два варіанти оригінального переносного устаткування для механізованого лазерного зварювання [14].

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.

У роботах [15–17] велика увага приділяється одному з напрямів розвитку лазерного зварювання, а саме – автоматизованому лазерному зварюванню (АЛЗ).

Заслуговують на увагу дослідження, спрямовані на визначення методів зварювання [18–23], що забезпечують легкість управління конфігурацією лазерного випромінювання, за допомогою якої формується міцна і високоякісна мікроструктура зварного шва та колошовного оточення для різних матеріалів. Проте принцип прийняття рішення в умовах дії непередбачених факторів при оптимізації режимів автоматизованого

лазерного зварювання залишається трудомістким, і тому проблематика параметричної оптимізації є першочерговою науковою проблемною задачею [24–25].

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

1.6 Класифікаційна схема наявних методів зварювання тонкостінних конструкцій

Одним із ключових моментів в отриманні якісного зварного шва є вибір методу зварювання [35]. Він є основним фактором також і у визначенні продуктивності виготовлення зварних конструкцій.

Розміри і форма шва значною мірою зумовлюють:

- плавність переходу від основного металу до металу шва;
- економічність процесу
- стійкість шва проти виникнення:
 - кристалізаційних тріщин;
 - ймовірності утворення підрізів;
 - ймовірності утворення непроварів;
 - ймовірності утворення напливів та інших дефектів [36].

Найбільш прогресивним і економічним процесом отримання тонкостінних конструкцій є стикове зварювання заготовок у вигляді стрічки [31–35, 41–42].

Для виготовлення тонкостінних зварних конструкцій із заготовок у вигляді стрічки найбільш перспективним є зварювання плавленням, яке

розвивається по лінії застосування висококонцентрованих джерел енергії [31–35, 41–42], а саме:

- мікроплазменне;
- електронно-променеве;
- лазерне зварювання.

Класифікаційну схему наявних методів зварювання тонкостінних конструкцій зображено на рис. 1.1.

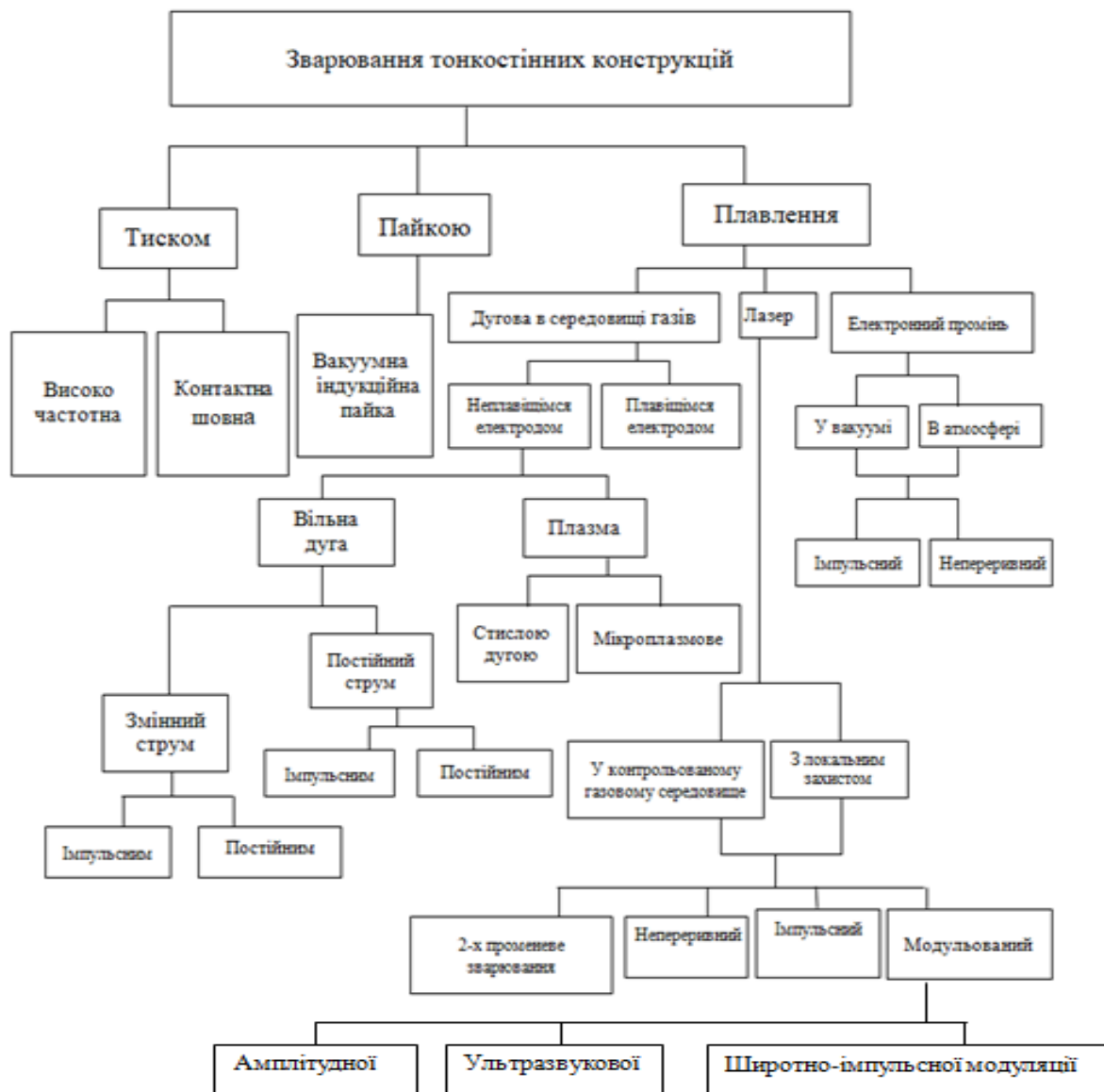


Рис. 1.1. Класифікаційна схема методів зварювання тонкостінних конструкцій

З перелічених методів зварювання тонкостінних конструкцій (рис. 1.1) інтерес становить лазерний метод плавлення модульованим імпульсом при використанні амплітудної, ультразвукової та широтно-імпульсної модуляції.

1.7 Аналіз компонентів зв'язку для передачі відповідної інформації

Визначення компонентів зв'язку для передачі інформаційних даних у лазерних технологічних комплексах недостатньо висвітлено в зарубіжній і вітчизняній літературі. Тому завдання вибору компонентів зв'язку для передачі даних пов'язано з високими потребами в інформаційних системах.

Великий внесок у теорію і практику провідних компонентів зв'язку для інформаційних систем управління зробили роботи: А. І. Андрєєвої, С. С. Грушко, А. В. Жучкова, Ю. А. Кулакова, Г. М. Луцького, Н. П. Проскуріна, А. Б. Семенова, А. М. Сергєєва та ін.

Однак при проектуванні інформаційних систем управління процесом автоматизованого лазерного зварювання для швидкого аналізу відсутня сукупність характеристик дровових сучасних компонентів зв'язку і дослідження їх динамічного розвитку.

Тому реляційна модель за основними характеристиками сучасних провідних компонентів зв'язку для інформаційної системи управління побудована за допомогою мідної крученої пари провідників і кабелів оптоволоконних на основі пластика або скла, які наведено в табл. 1.1.

Порівняльний аналіз основних характеристик дровових типів компонентів зв'язку для систем управління показав, що кабель на основі мідних кручених пар провідників має деякі істотні недоліки, а саме:

- сигнал на відстані понад 100 м швидко згасає (необхідно використовувати повторювач та підсилювач);
- існує чутливість до впливу електромагнітних хвиль;
- є доступ для несанкціонованого підключення [56–58].

Таблиця 1.1

**Реляційна модель компонентів зв'язку інформаційних систем
управління**

№ з/п	Тип кабелю Харак- теристики	Оптоволоконний на основі		Мідна кручена пара провідників
		пластика	скла	
1	Вплив електромагнітни х і радіочастотних хвиль	не впливає	не впливає	впливає
2	Робочий діапазон температур	від -40°C до +85°C	від -40°C до +60°C	від -20°C до +75°C
3	Монтажний діапазон температур	від -20°C до +70°C	від -20°C до +50°C	від -5°C до +50°C
4	Діаметр серцевини	до 1 мм	від 50 до 125 мкм (багатомодовий) і менше 10 мкм (одномодовий)	від 0,45 мм до 0,51 мм
5	Швидкість передачі даних	300 Мбіт/с	2,5 Гбіт/с (багатомодовий), 10 Гбіт/с (одномодовий)	від 10 Мбіт/с до 1000 Мбіт/с
6	Робоча довжина хвилі	650 нм	850, 1310, 1550 нм	-
7	Коефіцієнт загасання (Кз)	150 дБ/км	для одномодового волокна 0,5 дБ/км (при 1310 нм) і 0,4 дБ/км (при 1550 нм); для багатомодового волокна 3,0 дБ/км (при 850 нм)	від 21 дБ/км до 220 дБ/км

Продовження табл. 1.1

№ з/п	Тип кабелю Характеристики	Оптоволоконний на основі		Мідна кручена пара провідників
		пластика	скла	
8	Максимально допустиме зусилля на розтяг: короткострокове довгострокове	50 Н 1 Н	600 Н 1200 Н	400 Н 400 Н
9	Мінімальний радіус вигину: короткостроковий довгостроковий	25 мм 35 мм	55 мм 110 мм	12 мм 29 мм
10	Максимальна довжина сегмента	до 2 км	до 15 км	до 100 м
11	Можливість механічного ушкодження	низька (більш гнучкий)	середня (схильний до утворення мікротріщин)	висока
12	Особливості монтажу	не потребує високої кваліфікації, спеціального обладнання	необхідність у високій кваліфікованій робочій силі та спеціальному обладнанні	потребує спеціального обладнання

У результаті проведеного системного аналізу визначено, що найкращим провідним компонентом є оптоволоконний кабель на основі скла, тому що:

- швидкість передачі даних багатомодових і одномодових волокон – у 33 рази більша, ніж у оптоволоконного кабелю на основі пластика, і в 10 разів більша, ніж у кабелю на основі мідних кручених пар провідників;
- коефіцієнт загасання в оптоволоконному кабелі на основі скла – в 300 разів менший, ніж у оптоволоконного кабелю на основі пластика, і в 440

разів менший, ніж у кабелю на основі мідних кручених пар провідників [56–58].

1.6 Аналіз впливу температури на кристалізацію структури зварного шва

На підставі аналізу літературних джерел [26, 40, 41, 44, 59–63] встановлено, що при кристалізації металу ймовірність утворення зародків кристалу w_1 можна уявити як

$$w_1 = M_1 e^{-\Delta G_k / (k_B T)}, \quad (1.1)$$

де ΔG_k – критичне або максимальне значення вільної енергії;

k_B – стала Больцмана;

T – температура.

Водночас

$$\Delta G_k = \frac{16\pi s^3 T_{пл}^2}{3\Delta T^2 Q^2}, \quad (1.2)$$

де s – поверхневий натяг,

$T_{пл}$ – температура плавлення металу,

Q – прихована теплота кристалізації.

Однак зі збільшенням переохолодження процес дифузії буде гальмуватися, сповільнюючи підхід нових атомів з рідини до кристалу. Водночас ймовірність переходу з рідкої фази в тверду при утворенні зародка

$$w_2 = M_2 e^{-U / (k_B T)}, \quad (1.3)$$

де U – енергія активізації самодифузії.

Імовірність w , яка визначає кількість центрів кристалізації n , дорівнює добутку ймовірностей складових процесів

$$w = w_1 w_2 = M_3 e^{-(\Delta G_k + U) / (k_B T)}, \quad (1.4)$$

де M_1, M_2, M_3 – постійні коефіцієнти, що залежать від властивостей металу.

Після підстановки виразу (1.2) в (1.4) отримаємо ймовірність залежності кількості центрів кристалізації від температури

$$w = M_3 e^{-\left(\frac{16\pi s^3 T_{пл}^2}{3\Delta T^2 Q^2} + U\right)/(k_B T)}. \quad (1.5)$$

Приклад впливу ступеня переохолодження на умови утворення зародків наведено на рис. 1.2 [62, 63].

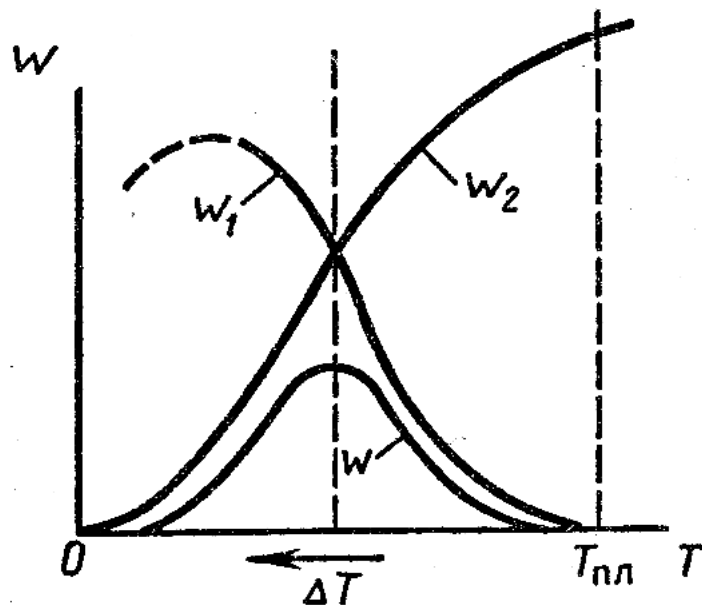


Рис.1.2. Залежність ймовірності появи зародків від ступеня переохолодження

Отже, під впливом двох протилежних тенденцій існує значення переохолодження, що забезпечує умови для утворення максимальної кількості зародків [43–47, 62, 63].

В роботах [62, 63, 81, 82] запропоновано класифікаційну схему методів модифікації структури зварного шва, зображену на рис. 1.3.

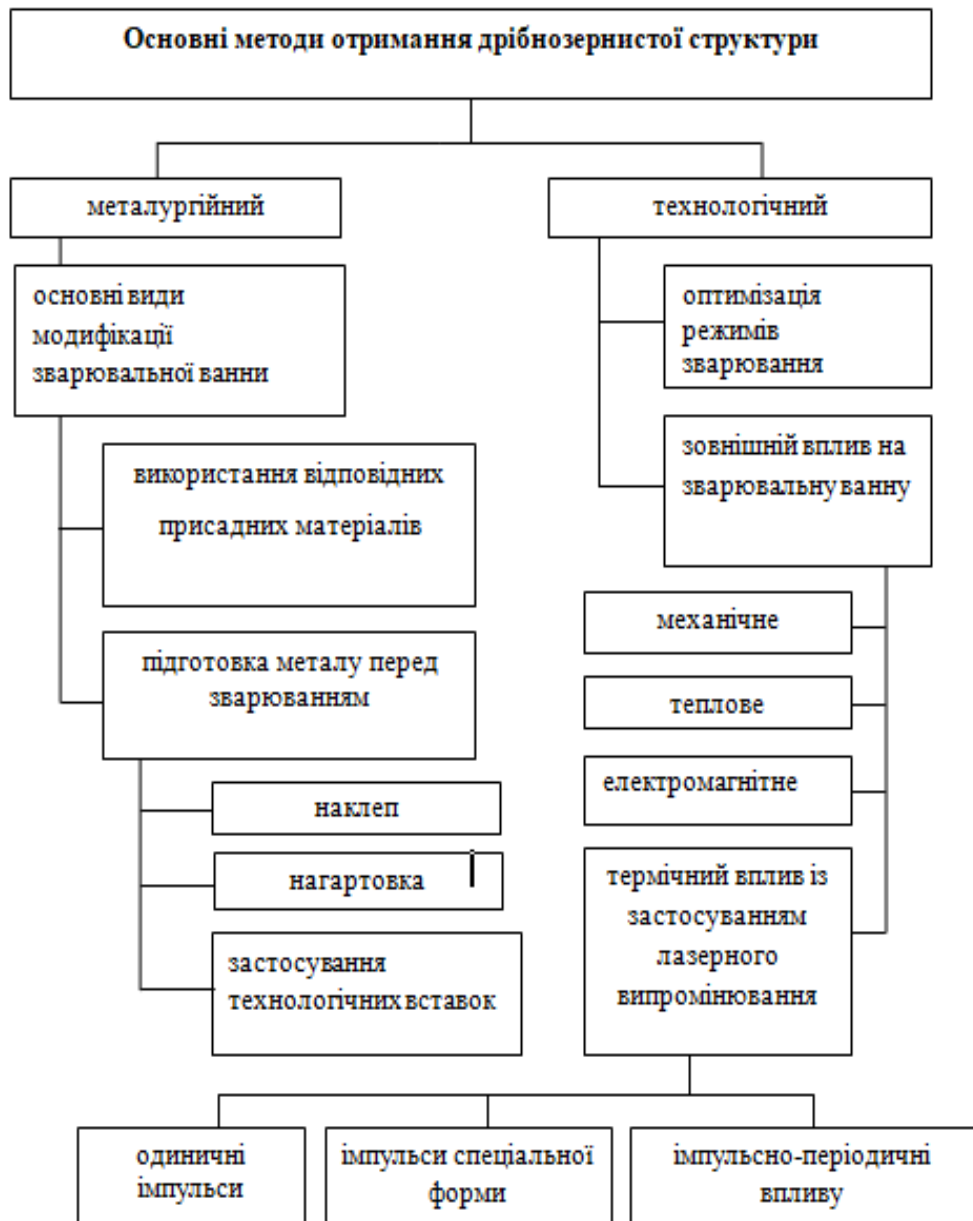


Рис. 1.3. Класифікаційна схема методів модифікації структури зварного шва

Із запропонованої класифікації видно, що одним із методів отримання дрібнозернистої структури шва є зовнішній тепловий вплив на зварювальну ванну з допомогою лазерного випромінювання.

Крім того, вплив лазерним випромінюванням може бути представлено у вигляді одиночного імпульсу, імпульсів спеціальної форми, а також у вигляді імпульсно-періодичного впливу.

Термічний цикл впливу є основою для управління параметрами режиму зварювання і, тим самим, він впливає на зміну структури в зварюваному металі. Приклад залежності щільності потужності лазерного випромінювання від часу його впливу в процесі зварювання для основних стадій процесу зварювання [17, 63, 82] показано на рис. 1.4.

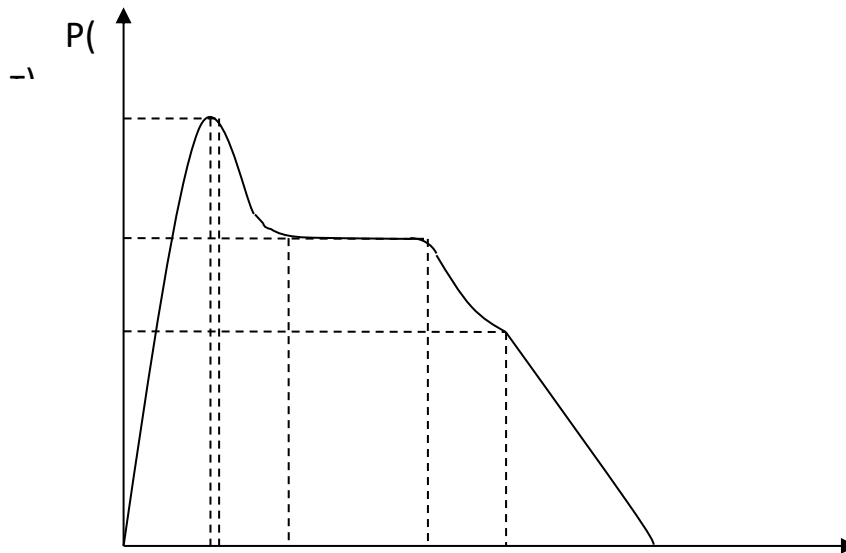


Рис. 1.4. Узагальнений графік залежності щільності потужності лазерного випромінювання від часу впливу на зварюваний метал:

τ_1 - τ_2 – час випаровування окисної плівки з поверхні металу;

τ_2 - τ_3 – час плавлення металу;

τ_3 - τ_4 – час плавлення по товщині;

τ_4 - τ_5 – час кристалізації литого металу;

τ_5 - τ_6 – час термообробки (відпал, нормалізація)

Залежність щільності потужності лазерного випромінювання від часу його впливу на зварюваний метал (рис. 1.4) показує, що для управління параметрами режиму зварювання необхідно змінювати конфігурацію імпульсу.

Енергетичні витрати на основних стадіях технологічного процесу є різними при отриманні зварювального з'єднання різних металів при одній і тій же товщині (2 мм) з високою якістю, що показано в табл. 1.2 [17, 63, 82].

**Енергетичні витрати при зварюванні різних металів
товщиною в 2 мм на основних стадіях процесу**

№ з/п	Вид зварювання Стадії процесу зварювання і потужність P , Вт/см ²	Точкове зварювання алюмінію	Шовне зварювання алюмінієвого сплаву АК-8	Шовне зварювання титану	Шовне зварювання титану BT-1	Точкове зварювання низько-вуглецевої сталі
1	Випаровування окисної плівки, P	$1,5 \cdot 10^8$	$2,0 \cdot 10^8$	$3,0 \cdot 10^8$	$5,0 \cdot 10^8$	$2,5 \cdot 10^5$
2	Плавлення, P	$1,3 \cdot 10^6$	$2,5 \cdot 10^6$	$1,0 \cdot 10^7$	$1,5 \cdot 10^7$	$8,2 \cdot 10^4$
3	Термо-обробка, P	$1,2 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10^3$	$0,5 \cdot 10^4$	$1,0 \cdot 10^4$	$0,5 \cdot 10^4$

З табл. 1.2 видно, що щільність потужності термічного циклу для відповідної стадії технологічного процесу зварювання є різною.

Тенденція зменшення необхідної щільності потужності зберігається зверху вниз для всіх металів, що зварюються, і має індивідуальне конкретне значення. Звідси випливає висновок, що для отримання якісного з'єднання лазерним випромінюванням необхідно на етапі підготовки процесу зварювання: вибрати відповідний матеріал для з'єднання лазерним випромінюванням і визначити конфігурацію модульованого лазерного випромінювання.

Таким чином, з'явилася можливість регулювання ступенем переохолодження металу, що зварюється. Під впливом лазерного випромінювання з визначеною конфігурацією забезпечується зміна температури зварювальної ванни в області зони фазових переходів «liquidus - solidus» [17, 64–69, 78, 81, 82].

1. Відомий метод лазерного зварювання, згідно з яким для більш ефективного використання енергії джерела живлення лазера, у разі його роботи в режимі генерації імпульсів, застосовують широтно-імпульсну модуляцію розрядного імпульсу [74, 75]. Такий підхід дає змогу змінювати інтенсивність лазерного випромінювання в часі, що приводить до зниження внутрішніх напружень і пористості зварного шва при лазерному зварюванні високовуглецевих сталей, відливок із пустотами і включеннями забруднюючих речовин, матеріалів з різною температурою плавлення.

Недоліком відомого способу є те, що вплив на зварювальну ванну здійснюється лише за рахунок низькочастотного змінювання інтенсивності випромінювання згідно з формою лазерного імпульсу.

Для усунення зазначеного недоліку може використовуватися наступний метод лазерного зварювання [75], згідно з яким у ванну лазерного розплаву додатково вводяться ультразвукові коливання із додаткового джерела ультразвукового коливання. Це сприяє більш повним структурно-фазовим перетворенням, що, в свою чергу, забезпечує зварювання без тріщиноутворення.

Недоліком відомого методу є складна реалізація, яка пов'язана із необхідністю додаткового джерела ультразвукових коливань, а також складністю введення цих коливань у ванну лазерного розплаву.

1.7 Аналіз наявних інформаційних технологій оцінювання багатопараметричних компонентів апаратного забезпечення збору даних

Існуючі узагальнені функції пошуку [51, 76–78, 82] забезпечують умови порівняння компонентів апаратного забезпечення збору даних і управління та допомагають вибрати найкращі з визначеної множини.

У роботах І. П. Норенкова, Т. Сааті, В. В. Сергієва, Б. Л. Собкіна, П. М. Таланчука, М. Н. Фоміна, Є. О. Чернявського та інших у різній формі запропоновано низку узагальнених показників компонентів [76–78, 80].

Водночас функції пошуку класифікують [78, 79] наступним чином:

- мультиплікативні (використовують операції множення, ділення);
- адитивні (узагальнені показники визначаються шляхом складання

відповідних часткових показників, помножених на нормовані вагові коефіцієнти)

$$K = \sum_{i=1}^n \lambda_i W_i,$$

де W_i – сукупність вихідних характеристик;

λ_i – нормований ваговий коефіцієнт, що враховує значимість W відповідної (часткової) характеристики [80].

В роботах Є. О. Чернявського, Д. Д. Недосекіна, В. В. Олексєєва та працях [76–80] функція пошуку будується у двох формах:

- декомпозиційна;
- композиційна.

Декомпозиційна форма формується у вигляді логічного оператора, що об'єднує локальні процедури пошуку типу

$$W(X) = \bigcap_l K_l F_l(X),$$

де K_l – логічний вектор;

$F_l(X)$ – функція.

Недоліком є те, що функція $F_l(X)$ повинна бути диференційованою.

Найбільш розповсюджені наступні композиційні форми, які формуються у вигляді адитивної суми часткових критеріальних показників, приклади яких наведено нижче:

- Функція Лагранжа

$$W(X, \lambda) = S(X) + \sum_{i=1}^m \lambda_i [F_i(X)],$$

де $S(X)$ – функція цілі;

λ_i – невизначений множник Лагранжа.

- Лінійна композиція часткових критеріїв

$$W(X) = \sum_{i=1}^m \alpha_i F_i(X),$$

де α_i – вагова функція.

- Функція штрафу

$$W(X) = S(X) + \sum_{i=1}^m C_i [F_{oi} - F_i(X)]^2,$$

де F_{oi} – оптимальне значення деякої функції;

C_i – вагова функція штрафу.

- Функція пошуку оптимального значення $S_0(X)$ цільової функції $S(X)$ з обмеженням решти критеріальних компонентів

$$S_0(X) = \min(\max) S(X) \text{ при } W_j \leq W_{oj}.$$

- Мінімаксі (максіміні), тобто найкращий із найгірших або навпаки.

Недоліками наявних узагальнених показників є те, що функція пошуку повинна бути диференційованою, крім того, вагові коефіцієнти мають суб'єктивний характер.

Тому створення універсальної математичної моделі для визначення єдиного узагальненого показника якості компонентів МПС керування є актуальною задачею.

Аналіз перелічених функцій пошуку показує, що вони мають загальний недолік – наявність суб'єктивності в оцінюванні відповідного параметра.

В цій операції багато часу витрачається на пошук потрібної інформації.

Крім того, висуваються високі вимоги до кваліфікації розробника і, як наслідок, збільшується вартість виробу.

Тому доцільно для подальшого розвитку інформаційної технології об'єктивного оцінювання багатопараметричних компонентів апаратного забезпечення збору даних і управління використовувати алгоритм функції пошуку, що зазначено в роботі [78].

1.8 Формулювання основних завдань наукового дослідження

У дисертаційній роботі на основі проведеного аналізу сучасного стану предмета дослідження потрібно вирішити наступні завдання:

- Провести аналіз наявних інформаційних технологій прийняття рішень в умовах дії непередбачених факторів на прикладі управління процесом зварювання тонкостінних конструкцій.
- Побудувати спеціалізовану інформаційну базу знань на основі формування реляційних моделей основних параметрів режимів зварювання за результатами експериментальних досліджень в умовах дії непередбачених факторів.
- 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.

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

Висновки до розділу 1

Перший розділ присвячений аналізу стану предмета дослідження та формування наукового завдання:

- проведено аналіз особливостей лазерного зварювання тонкостінних конструкцій і визначено сфери застосування;
- розроблено класифікаційну схему наявних методів зварювання тонкостінних конструкцій, аналіз яких підтвердив перспективність методу лазерного зварювання тонкостінних конструкцій, але недостатньо інформації про визначення найкращих параметрів режиму з'єднання тонкостінних конструкцій в умовах дії непередбачених факторів;
- визначено необхідність підвищення інформативності в напрямі створення спеціалізованої інформаційної бази знань для зварювання тонкостінних конструкцій в умовах дії непередбачених факторів;
- проведено аналіз впливу температури на кристалізацію структури зварного шва, що забезпечило визначення напрямку управління процесом кристалізації;
- проведено аналіз існуючих принципів оцінювання компонентів апаратного забезпечення збору даних, за результатами якого визначено найкращий принцип оцінювання та напрям його використання для подальшого розвитку спеціалізованої інформаційної бази даних щодо вибору компонентів з найкращими параметрами;
- на основі аналізу сучасного стану предмета дослідження сформульовано завдання, які необхідно вирішити у дисертаційній роботі.

Список використаних джерел до розділу 1

- [1] В. Д. Шелягин, А. Г. Лукашенко, В. Ю. Хаскін, А.В. Бернацький, А.В. Сикора, Д. А. Лукашенко, И.В.Шуба, "Разработки в области техники и технологии лазерной сварки, выполненные в ИЭС им. Е.О.Патона(Обзор)", Автоматическая сварка, № 12, 2017, С 57-62.
- [2] Lukashenko, A. G. Three-coordinate laser technological complex on CO₂ basis [Текст] // V. D. Shelyagin, D. A. Lukashenko, V. M. Lukashenko, M. N. Ozirskaja, V. A. Lukashenko // Przemysl : Nauka i studia. – 2010. - № 8 (30). - С. 81-88.
- [3] Гаращук, В. П. Основи фізики лазерів. Лазери для термічних технологій: Навчальний посібник. [Текст] / В. П. Гаращук – Київ : ІЕЗ ім. Є. О. Патона, 2005. – 244 с.
- [4] Накатані, Х. Розробка потужних волоконних лазерів і їх застосування. [Текст] / Х. Накатані (япон.) // “Зварювальна техніка” – 2004. - №3 - С. 108-114.
- [5] Лукашенко, А. Г. Физическая модель трехкоординатного технологического комплекса на базе CO₂-Laser [Текст] / А. Г. Лукашенко, Д. А. Лукашенко, В. М. Лукашенко, М. Н. Озирская, В. А. Лукашенко. // Зб. наук. праць Кіровоградського національного технічного університету / Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. Кіровоград: КНТУ. – 2011. – вип. 24.– С. 77-82.
- [6] Сварка лазерным излучением [Электронный ресурс] / Тематический сайт WWW.TEHNAINFA.RU, раздел «Сварка». — Режим доступа : \WWW/ URL: <http://www.tehnoinfo.ru/tehnologijasvarki/23.html/> — 24.11.2011 г. — Загл. с экрана.
- [7] Шелягин, В. Д. Лазерная сварка тонколистовых сталей с использованием специальных приемов [Текст] / В. Д. Шелягин, В. Ю. Хаскин, А. В. Сиора, А. В. Сахарнов, Е. И. Гончаренко // Автомат. сварка. – 2003. - № 1 – С. 41-44.

- [8] Лукашенко А.Г. Оптимальный метод определения параметров режима лазерной сварки тонкостенных конструкций / А. Г. Лукашенко, Д. А. Лукашенко, И. А. Зубко, Р. Е. Юпин, В. М. Лукашенко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – № 6/5 (54). – С. 48–51, ISSN 1729-4061 (Online), ISSN 1729-3774 (Print)
- [9] 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.
- [10] H. Exner, J. Drechsel, S. Klotzer, und V. Neumann, "Handgefuhrtes Fugen: LaserBearbeit-ungskopf fur mobiles Laserschweissen", Laser-Prax, № 3, S. 14-15, 1999; Bd. 1, S. 145-159, 2001.
- [11] S. Keitel, "Manuelles Laserstrahlschweipen-Entwicklungs-perspektiven und Standder Auwendung", Hochleistungsfuegeverfahren-7 Inter. Aachener Schweiptechnik Kollo-guium, Aachener, Dentschland, 3-4 Mai, 2001.
- [12] "Laserstrahl "Handschwcissgerat" LHSG-1", Techn.-inf. Halle: Berichte-SLV, 2000.
- [13] "Laserstrahl "Handschwcissgerat" LHSG-2", Techn.-inf. Halle: Berichte-SLV, 2000.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.

- [17] А. Г. Лукашенко, Т. В. Мельниченко, и Д. А. Лукашенко, "Лазерная сварка тонколистовой нержавеющей стали модулированным излучением", Автоматическая сварка, № 4, с. 19-23, 2012.
- [18] 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) В 23К 26/2: пат. на винахід 109328 С2 Україна, № а 2013 14855, заявл. Груд. 18, 2013, опубл. Серп. 10, 2015, Бюл. № 15.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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. Ракетнокосмическая техника, т. 19, № 4, с. 121- 129, 2011.
- [23] 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) В23К 26/00: пат. 68159 Україна, № и 2011 13985, заявл. Листоп. 28, 2011, опубл. Берез. 12, 2012, Бюл. № 5.
- [24] В. В. Лимаренко, И. П. Хавина, и А. Н. Рисованный, "Постановка и решение задачи параметрической оптимизации операций резания металлов и обработки материалов", Системи управління, навігації та зв'язку, Полтава, вип. 4 (44), с. 20-24, 2017.

- [25] В. В. Лимаренко, и И. П. Хавина, "Решение задачи оптимизации параметров обработки металлов при операции точения", *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*, Харків, вип. 3 (83), с. 77-86, 2017.
- [26] А. В. Бернацький, В. Д. Шелягін, О. В. Сіора, В. М. Сидорець, та О. М. Берднікова, "Вплив просторового положення при лазерному зварюванні на рівень якості зварних з'єднань зі сталі AISI 321", *Автоматичне зварювання*, № 1, с. 15-24, 2020.
- [27] 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.
- [28] В. М. Нестеренков, Л. А. Кравчук, та М. О. Русиник, "Вплив технологічних і металургійних факторів на формування зварних з'єднань міді при електроннопроменевому зварюванні", *Автоматичне зварювання*, № 2, с. 38-42, 2021.
- [29] 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.
- [30] В. Ю. Хаскін, В. М. Коржик, Ч. Донг, та Є. 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. Shel
- [31] Д. А. Гардер «Інформаційна технологія параметричної оптимізації режимів автоматизованого лазерного зварювання в умовах невизначеності» *Вісник ЧДТУ*. Черкаси: ЧДТУ, 2021.
- [32] Стасовский Ю.Н. Научные основы ресурсосберегающих технологий производства прецизионных труб малых размеров применительно к условиям мини-производств с использованием тонкостенной сварной заготовки / Ю.Н. Стасовский // *Сучасні проблеми металургії*. – 2008. – том 11. – с.377–384.

- [33] Стасовский Ю.Н. Прецизионные трубы // Металл и литье Украины.-2008. - №1. – с.47-51.
- [34] Стасовский Ю.Н., Верещагин А.А. Прогрессивные ресурсосберегающие экологически безопасные технологии. Прецизионные трубы // Металл и литье Украины.-2008. - №1. – с.47-51.
- [35] І.З. Засядько, І.П. Корнієць. Зварювання тонколистових конструкцій., - Київ: Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2010.- Вип.5. – С.81-87.
- [36] Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением. Под ред. акад. Б. Е. Патона. – М.: Машиностроение, 1974. – 768 с.
- [37] <http://www.thefabricator.com/article/tubepipeproduction/laser-welding-of-stainless-pressure-tubes>
- [38] <http://www.medicaldevice-network.com/features/feature81029/>
- [39] Daurelio G. On the welding of austenitic/ferritic stainless steels by an High Power Diode Laser / G. Daurelio, F. Memola Capece Minutolo, F. Curcio, F. Caiazzo // Proceedings of AMME'2003. – Vol. 12. – 7-10 December 2003. – С. 187–190.
- [40] Nobuyuki, F. Yoshinori, I. Takashi, T. Masahiro // Transactions of JWRI. – Vol.34. – 2005. – No. 1. – С.19-23.
- [41] Григорьянц А.Г. Технологические процессы лазерной обработки : [учеб. пособие для вузов] / А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.И. Мисюров; под ред. А.Г. Григорьянца. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 664 с.
- [42] Шелягин В.Д., Лукашенко Д.А., и др. Лазерная сварка тонколистовой нержавеющей стали// Автомат. Сварка. – 2011. - №4 – С. 45-49.
- [43] <http://www.orc.soton.ac.uk/61.html>
- [44] В.Д. Шелягін, В.І. Луценко, В.Ю. Хаскін, А.Г. Лукашенко, А.В. Бернацький, О.В. Сіора і І.В. Шуба. «Розробка обладнання та технології автоматизованого лазерного зварювання трубних компенсуючих

елементів для авіакосмічної промисловості». *Наука та інновації*. Т. 8. № 6. С. 53-59. 2012.

[45] Корчагин П.В. Аргонодуговая сварка деталей с большой разницей толщин из стали типа 18-8: Дис. к.т.н. по спец. 05.03.06 – технологии и машины сварочного производства / Корчагин П.В. // Тольятти, 2006. – 147 с.

[46] Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н. Лазерная техника и технологии // Лазерная сварка металлов: Учеб. Пособие для вузов / Под ред. А.Г. Григорьянца. – М.: Высш. шк., 1988. – 207 с.

[47] Васильев О. С., Горный С. Г. (2016). Технология создания поверхностных микроструктур на листовых материалах с использованием волоконного лазера. Научно-производственный журнал "Металлообработка", 3 (93).

[48] Д. А. Лукашенко, В. Ю. Хаскин, А. Г. Лукашенко, А. В. Сиора, А. В. Бернацкий (2011). Сварка тонколистовой нержавеющей стали волоконным лазером. Весник ДНУ. Ракетно-космическая техника, т. 19, №4: 121-129.

[49] A. Nobuyuki, F. Yoshinori, I. Takashi, T. Masahiro (2005). Micro Welding of Thin Stainless Steel Foil with a Direct Diode Laser. Transactions of JWRI. – Vol. 34. №1.: 19-23.

[50] А. Г. Лукашенко, В. М. Лукашенко, С. А. Міценко та ін. (2010). Основні характерні особливості сучасних лазерів. VI Міжнародна научна практична конференція Т. 23.: 9–12.

[51] А. Г. Лукашенко (2014). Математична модель узагальненого показника якості компонентів лазерного технологічного обладнання. Вісник Хмельницького національного університету, № 4: 31-36.

[52] T. Gottwald et al. (2012). Recent disk laser development at TRUMPF. Proc. SPIE 8547, High-Power Lasers 2012: Technology and Systems, 85470C.

[53] Y. Peng et al (2013). Near fundamental mode 1.1 kW Yb:YAG thin-disk laser. Opt. Lett. 38: 1709-1711.

[54] A. Carter, B. Samson, K. Tankala, D. P. Machewirth, V. Khitrov, U. H.

Manyam, F. Gonthier, F. Seguin. Damage Mechanisms in Components for Fibre Lasers and Amplifiers», Proc. of SPIE Vol. 5647.

[55] Mazurets A.V. (2015). Features of using of the information technology of automated definition of terms in educational materials. Materials of the IV International Scientific Conference «Information-Management Systems and Technologies» 22th – 24th September: C.62.

[56] Кулаков Ю. О. Комп'ютерні мережі : підруч. / Ю. О. Кулаков, Г. М. Луцький ; за ред. Ю. С. Ковтонюка. – К. : Вид. Юніор, 2005. – 400 с.

[57] ITU-T. Характеристики среды передачи // Волоконно-оптические кабели : [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.itu.int/itu-t/recommendations/rec.aspx?id=10389>.

[58] Семенов А. Б. Волоконно-оптические подсистемы современных СКС / А. Б. Семенов. – М. : Академия АйТи; ДМК Пресс, 2006. – 632 с.

[59] Bruncko J. Laserové mikrozvarovanie kovových materialov / J. Bruncko // Zvaranie-svarovani. – 2010. – № 9/10. – S. 219–222.

[60] Celen S. Effect of laser welding parameters on fusion zone morphological, mechanical and microstructural characteristics of AISI 304 stainless steel / S. Celen, S. Karadeniz, H. Ozden // Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. – 2008. – № 39.

[61] Левин Ю. Ю. Физико-технологические условия получения бездефектных соединений при импульсной лазерной сварке / Ю. Ю. Левин, В. А. Ерофеев, В. А. Судник // Свароч. пр-во. – 2008. – № 4. – С. 20–24.

[62] Лукашенко А. Г. Лазерная сварка тонколистовой нержавеющей стали модулированным излучением / А. Г. Лукашенко, Т. В. Мельниченко, Д. А. Лукашенко // Автоматическая сварка. – 2012. – № 4. – С. 19–23.

[63] Методы прогрессивных технологий, обеспечивающих мелкозернистую структуру сварочного шва / А. Г. Лукашенко, В. А. Лукашенко, В. М. Лукашенко, Т. Ю. Уткина, Д. А. Лукашенко, А. С. Лихолай // Новината за напреднали наука – 2012 : материали VIII Международна научна практична конференция : (17–25 мая 2012 г.,

София, Болгария). – София: «Бял ГРАД-БГ» ООД, 2012. – Т. 24. – С. 3–8.

[64] Стасовский Ю.Н., Верещагин А.А. Прогрессивные ресурсосберегающие экологически безопасные технологии. Прецизионные трубы // Металлы и литье Украины.-2008. - №1. – с.47-51.

[65] <http://www.thefabricator.com/article/tubepipeproduction/laser-welding-of-stainless-pressure-tubes>

[66] <http://www.medicaldevice-network.com/features/feature81029/>

[67] Daurelio G. On the welding of austenitic/ferritic stainless steels by an High Power Diode Laser / G. Daurelio, F. Memola Capece Minutolo, F. Curcio, F. Caiazzo // Proceedings of AMME'2003. – Vol. 12. – 7-10 December 2003. – С. 187–190.

[68] Nobuyuki A. Micro Welding of Thin Stainless Steel Foil with a Direct Diode Laser / A. Nobuyuki, F. Yoshinori, I. Takashi, T. Masahiro // Transactions of JWRI. – Vol.34. – 2005. – No. 1. – С.19-23.

[69] І.З. Засядько, І.П. Корнієць. Зварювання тонколистових конструкцій., - Київ: Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2010.- Вип.5. – С.81-87.

[70] Словарь по кибернетике: Св. 2000 ст. / Под. Ред. В.С. Михалевича. – 2-е изд. – К.: Гл. ред. УСЭ им. М.П. Бажана, 1989. – 751 с.

[71] Автоматизированные системы управления технологическими процессами (справочник) / А.З. Грищенко, В.П. Грищук, В.М. Денисенко и др. Под ред. акад. Б.Б. Тимофеева – К.: Техника, 1983. – 351 с.

[72] Заморин А.П., Марков А.С. Толковый словарь по вычислительной технике и программированию. Основные термины: около 3000 терминов. – М.: 1988. – 221 с.

[73] Словарь иностранных слов. – 18-е изд., стер. М.: Техника. 1989. – 624 с.

[74] Получение импульсов лазерного излучения с изменяющейся во времени интенсивностью / Компания ООО «СТК-ВИКОМ» // Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.ipower.ru/article/article3/index.html>.

[75] Гуреев Д.М. Влияние ультразвука на изменение структурно-

напряженного состояния в ваннах лазерного расплава // Квантовая электроника, 24, №4, 1997. – С. 338-340

[76] А. Г. Лукашенко, “Математична модель узагальненого показника якості компонентів лазерного технологічного обладнання”, *Вісник Хмельницького національного університету*, № 4, с. 31-36, 2014.

[77] А. Г. Лукашенко, С. А. Галушка, А. В. Гавриш, А. О. Циба, та В. М. Лукашенко, “Єдиний узагальнений показник якості для компонентів мікропроцесорних систем”, на *X Міжнародна научна практична конференція “Ключови въпроси в съвременната наука – 2014”*, София, Болгария, Апр. 17-25, 2014. София : Бял ГРАД-БГ ООД, 2014, т. 35, с. 3-9.

[78] Лукашенко А.Г. Развитие методов та моделей энергоефективных компонентів комп’ютерно-інтегрованих систем ресурсозберігаючого технологічного обладнання спеціального призначення : дис. докт. техн. наук : 05.13.05. Черкаси: ЧДТУ, 2021. 383 с.

[79] Чернявский Е. А. Измерительно-вычислительные средства автоматизации производственных процессов / Е. А. Чернявский, Д.Д. Недосекин, В.В. Алексеев. - Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 272 с.

[80] Собкин Б.А. Автоматизация проектирования аналого-цифровых приборов на микропроцессорах / Б. А. Собкин. - М: Машиностроение, 1986. - 128 с.

[81] 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.

[82] 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 *VIII МНПК Новината за напреднали наука – 2012*, София, Болгария, мая 17-25, 2012. София: Бял. ГРАД-БГ ООД, 2012, т. 24, с. 3-8.

РОЗДІЛ 2

СПЕЦІАЛІЗОВАНА БАЗА ЗНАНЬ ЧЕРЕЗ РЕЛЯЦІЙНІ МОДЕЛІ ПАРАМЕТРІВ РЕЖИМІВ ЗВАРЮВАННЯ ПРИ ДІЇ НЕПЕРЕДБАЧЕНИХ ФАКТОРІВ

У другому розділі 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.

2.1 Реляційні моделі основних параметрів режимів лазерного зварювання за результатами експериментів

Складність визначення основних параметрів режимів лазерного зварювання полягає у тому, що процес проводиться в умовах дії непередбачених факторів.

Відомо [4-13], що на якість зварного шва впливають: фізико-хімічні властивості матеріалів, що зварюються, навколишнє середовище, обладнання, пристосування, зварювальний і вимірювальний інструмент. Тому для визначення кращого режиму автоматизованого лазерного зварювання тонкостінних конструкцій необхідно проводити відповідне дослідження, на яке витрачається багато часу, енергії, площі виробничого простору, високоточних вимірювальних пристроїв для їх моніторингу, висококваліфікованих робітників. Ця сукупність витрат призводить до збільшення собівартості виробу.

Тому підвищення ефективності інформаційної технології параметричної режимів автоматизованого лазерного зварювання в умовах невизначеності є першочерговим завданням.

Для вирішення цієї проблематики запропоновано створити інформаційну модель знань відношень ширини зварного шва, швидкості та потужності режимів зварювання тонкостінних конструкцій за результатами експерименту. Інформаційний збір здійснюється за методикою щодо проведення експерименту, яка детально описана в роботі [3].

Основними процедурами підготовчого етапу [1–3] є:

- інформаційний збір документації, необхідної для процесу автоматизованого лазерного зварювання тонкостінних конструкцій (вимоги до виробу та інформаційні карти технологічного процесу);
- збір інформації щодо відповідного обладнання для зварювання та його підготовка;

– підготовка зразків матеріалу щодо зварювання (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);

– визначення інструменту: ітербієвий волоконний одномодовий лазер типу ЛС-01-Б потужністю випромінювання 100 Вт, діаметром пучка лазерного випромінювання 10 мкм;

– інформаційний збір щодо інертних газів для захисту зони плавлення (інертні гази: зверху гелій, а знизу аргон);

– вимірювальний інструмент – мікроскоп ММІ-2.

Результатом експерименту є створення реляційних моделей за експериментальними даними, які представляються схемами відношень (табл. 2.1 і 2.2) [1–3].

У табл. 2.1 представлено реляційну модель ширини шва зварного з'єднання та швидкості лазерного зварювання при постійному значенні потужності лазерного випромінювання за результатами експерименту в умовах дії непередбачених факторів:

$$b(V) \text{ при } P = \text{const},$$

$$b_1 = \varphi_1(V_i, P_J); \quad (2.1)$$

де індекс « i » показує належність до поточного значення відповідного параметра V_i , а індекс « j » належить параметру, значення якого дорівнює відповідній незмінній величині:

$$P_J = \text{const}.$$

Таблиця 2.1

**Реляційна модель даних ширини шва зварного з'єднання
та швидкості лазерного зварювання при постійному значенні
потужності лазерного випромінювання**

Зразок № 1, сталь 12X18H10 , $\delta=0,15$ 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	-	-	-

Аналіз результатів дослідження (табл. 2.1) 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 .

У табл. 2.2 подано схему відношень ширини шва зварного з'єднання та потужності лазерного випромінювання при постійному значенні

швидкості лазерного зварювання за результатами експерименту в умовах дії непередбачених факторів

$$b(P) \text{ при } V = \text{const},$$

тобто

$$b_2 = \varphi_2(P_i, V_J). \quad (2.2)$$

Таблиця 2.2

Реляційна модель даних ширини шва зварного з'єднання та потужності лазерного випромінювання при постійному значенні швидкості лазерного зварювання

Зразок № 1, сталь 12X18H10T, $\delta=0,15$ 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 (табл. 2.2) показав, як впливає значення потужності лазерного випромінювання при постійному значенні швидкості лазерного зварювання на ширину шва зварного з'єднання, а саме: ширина шва b збільшується при збільшенні потужності P випромінювання.

Таким чином, створені схеми відношень: потужності лазерного випромінювання при постійному значенні швидкості лазерного зварювання, швидкості лазерного зварювання при постійному значенні потужності лазерного випромінювання щодо геометричних розмірів шовного з'єднання b .

Результати експериментів підтвердили важкість визначення кращих параметрів режимів зварювання через суперечність впливу на ширину шва зварювання b значень параметрів V та P .

Для розв'язання цієї проблемної задачі пропонується визначити математичні моделі для опису цих залежностей.

2.2 Графічне представлення залежностей визначених параметрів режимів лазерного зварювання та визначення апроксимуючих функцій

Графоаналітичні методи, які ґрунтуються на використанні функціональних φ_1 , φ_2 залежностей між шириною зварного шва та швидкістю зварювання або шириною зварного шва та потужністю режиму зварювання:

$$b_1 = \varphi_1(V_i, P_j); \quad (2.3)$$

$$b_2 = \varphi_2(P_i, V_j), \quad (2.4)$$

де індекс « i » показує належність до поточного значення відповідного параметра: або V_i , або P_i , індекс « j » належить параметру, значення якого дорівнює відповідній незмінній величині: або $P_j = \text{const}$, або $V_j = \text{const}$.

На підґрунті реляційних моделей за експериментальними даними (табл. 2.1 і 2.2) в роботі запропоновано дві апроксимуючі функції, а саме: гіперболічна та сплайн-функції.

2.2.1 Дослідження результатів експериментів, що апроксимовані гіперболічною функцією

Графічні результати експериментів, що апроксимовані гіперболічною функцією (2.5), зображено на рис. 2.1.

$$b = 2,981 \cdot 10^{-3} + \frac{1,163}{v} \quad (2.5)$$

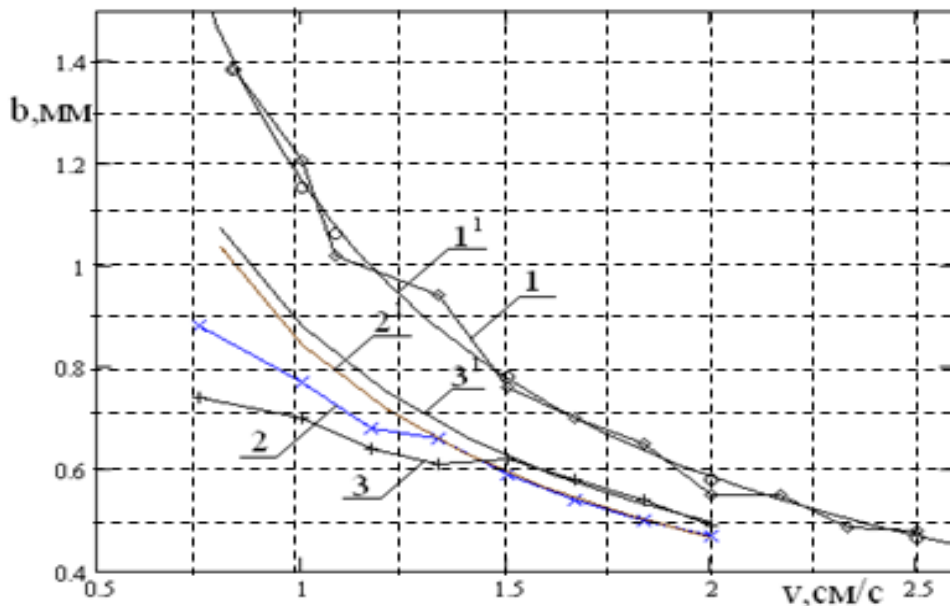


Рис. 2.1. Залежність ширини зварного шва b від швидкості лазерного зварювання V для зразків № 1, № 2 і № 3

Примітка: № 1, 1' – сталь 12X18H10T, $\delta = 0,15$ мм;

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

№ 3, 3' – сталь 1.4541, $\delta = 0,20$ мм

зв: (') – залежності, які апроксимовані гіперболічною функцією

апроксимуються гіперболічною функцією, яка описується формулою

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

Для сталі 1.4541 гіперболічна залежність має місце лише при швидкості зварювання 1,5...2,0 см/с, тому необхідно визначити іншу апроксимуючу функцію.

За результатами експерименту на рис. 2.2 побудовано залежності ширини зварного шва від потужності лазерного випромінювання.

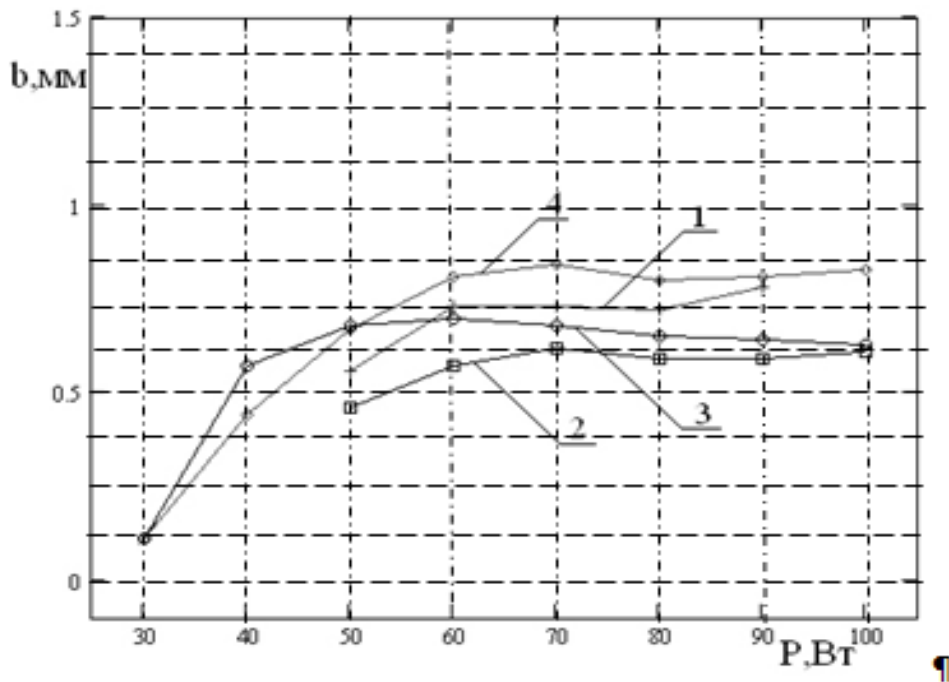


Рис. 2.2. Залежність ширини зварного шва b від потужності P лазерного випромінювання

- | | |
|---|---------|
| де 1 – сталь 12X18H10T, $\delta = 0,15$ мм при $V_{зв.1} = 1,5$ см/с = const; | } (2.6) |
| 2 – сталь 12X18H10T, $\delta = 0,15$ мм при $V_{зв.2} = 2,0$ см/с = const; | |
| 3 – сталь 1.4541 $\delta = 0,15$ мм при $V_{зв.3} = 0,8$ см/с = const; | |
| 4 – сталь 1.4541 $\delta = 0,20$ мм при $V_{зв.4} = 0,8$ см/с = const. | |

значення ширини зварного шва b залишається майже незмінним, якщо

$P \geq 60$ Вт, тому приймаються значення швидкості $V_{зв.i} = V_{зв.i \max} = const$ (2.6), які підтверджені експериментами.

Проте процес зварювання, як правило, характеризується ефективністю використання потужності лазерного випромінювання.

В роботі [3] запропоновано коефіцієнт η оцінювання ефективності використання потужності лазерного випромінювання як результат ділення обчисленого значення теплової потужності q на відповідне значення потужності лазерного випромінювання P .

Визначення q пропонується шляхом використання формули (2.7).

Розрахункове значення q визначається через значення максимальної температури $T_{\max}$, що на відстані y_0 від осі зварного шва визначається за відомою формулою

$$T_{\max} = \frac{0,484 q}{v \cdot c \gamma \cdot 2 y_0} \left(1 - \frac{\beta \cdot y_0^2}{2a} \right), \quad (2.7)$$

де q – теплова потужність лазерного пучка,

v – швидкість зварювання;

$c\gamma$ – об'ємна теплоємність;

β – коефіцієнт температуровіддачі;

a – коефіцієнт теплопровідності.

При $T_{\max} = T_{\text{пл}}$, що дорівнює температурі плавлення досліджуваної сталі, $2y_0 \approx b$.

При обчисленнях η , крім результатів, що отримано експериментально, використовувалися наступні теплофізичні характеристики нержавіючої сталі:

- коефіцієнт теплопровідності $\lambda = 0,25$ Вт/см·К;
- питома теплоємність $c = 3,97$ Дж/см³;

- коефіцієнт теплопровідності $a = 0,063 \text{ см}^2/\text{с}$;
- температура плавлення $T_{\text{пл}} = 1673 \text{ К}$.

Це дало змогу створити графічний метод щодо коефіцієнта оцінювання η ефективності використання потужності лазерного випромінювання та побудувати його залежність від зміни швидкості зварювання (рис. 2.3).

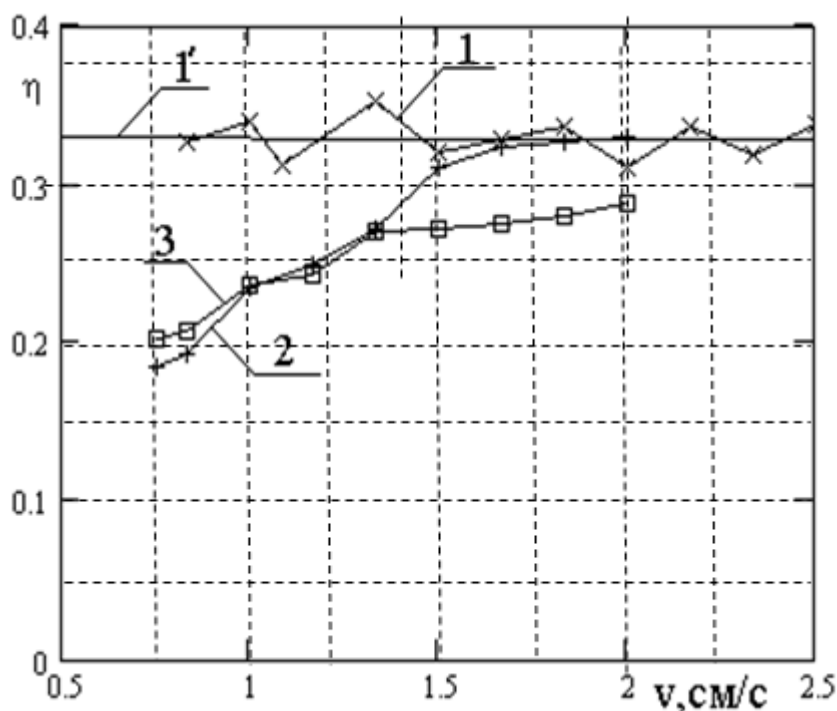


Рис. 2.3. Залежність коефіцієнта корисної дії η від швидкості зварювання V тонкостінних конструкцій:

1 – сталь 12X18H10T, $\delta = 0,15 \text{ мм}$, $P = 65 \text{ Вт}$, зразок № 1;

2 – сталь 1.4541, $\delta = 0,15 \text{ мм}$, $P = 55 \text{ Вт}$, зразок № 2;

3 – сталь 1.4541, $\delta = 0,2 \text{ мм}$, $P = 60 \text{ Вт}$, зразок № 3;

1'; 2'; 3' – апроксимуючі функції відповідно до зразків № 1, № 2, № 3

Інформаційний аналіз залежностей η від швидкості зварювання тонкостінних конструкцій показав, що краще значення $\eta = 0,33$ спостерігається у діапазоні $1,4 \dots 2,0 \text{ см/с}$ швидкості.

Згідно з отриманими оцінками ефективності процесу лазерного зварювання пропонується алгоритм визначення кращих параметрів режиму лазерного зварювання тонкостінних конструкцій за максимальним значенням коефіцієнта ефективності, значення якого становить 33 %.

2.2.2 Методика визначення кращих параметрів режиму лазерного зварювання в умовах дії непередбачених факторів

Методика визначення кращих інформаційних параметрів режиму лазерного зварювання тонкостінних конструкцій ґрунтується на розглянутих вище результатах дослідження: залежність ширини зварного шва b від потужності P лазерного випромінювання для зразків №1, № 2, № 3, які мають товщини $\delta = 0,15$ мм сталі 12Х18Н10Т; $\delta = 0,15$ мм сталі 1.4541; $\delta = 0,2$ мм сталі 1.4541 відповідно.

Аналіз визначених залежностей рис. 2.2 показав, що значення ширини зварного шва b залишається майже незмінним, якщо $P \geq 60$ Вт при максимальній швидкості зварювання.

В основу методики покладено основні наступні дії [3]:

1. Задати евристично значення ширини зварного $b_{зд}$ шва.
2. Визначити залежність ширини зварного шва від швидкості зварювання $b(V)$ при потужності $P = const$ експериментально.
3. Прийняти V_{max} , при якій забезпечується $b_{зд}$.
4. Визначити експериментально залежність $b(P)$ при $V = const = V_{max}$.
5. Визначити точку перегину, в якій значення $b(P)$ шва залишається незмінним при подальшому збільшенні потужності лазерного випромінювання P , що відповідає максимальному значенню використання потужності лазерного випромінювання, високий коефіцієнт ефективності якого становить $\eta = 33$ %.

Отримані значення швидкості зварювання, потужності є кращими в умовах дії непередбачених факторів.

Для проведення випробувань цієї методики використовувався трьохкоординатний лазерний комплекс типу «АРМА-100М» на підприємстві ЗАО «КЦКБА» м. Київ.

Застосування розробленої методики, поряд з впровадженням оригінальної технологічної оснастки, дало можливість забезпечити продуктивність одного такого комплексу до 5000 шт. трубних заготовок для сифонів на місяць.

Отже, верифікація цієї методики підтверджена результатами при розробці технології лазерного зварювання дрібних серій прямошовних тонкостінних зварних труб різного діаметра з нержавіючих сталей, що використовуються для виготовлення сифонів [3].

2.3 Дослідження результатів експериментів, що апроксимовані створеними сплайн-функціями

Аналіз результатів апроксимації (рис. 2.1) експериментальних даних гіперболічною функцією (2.5) показав, що при швидкості до 1,4 см/с апроксимуюча функція (2.5) добре збігається для зразка № 1, але для зразків № 2 і № 3 не відповідає вимогам апроксимації через велику похибку, тобто необхідно визначити іншу функцію.

Отже, пропонується створити математичні моделі (ММ) на основі апроксимуючих сплайн-функцій, при використуванні яких забезпечується можливість прийняття рішень по визначенню кращих значень параметрів режимів процесу автоматизованого лазерного зварювання тонкостінних конструкцій в умовах дії непередбачених факторів.

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

– для функціональної моделі (1) діапазон зміни швидкості V дорівнює

$$\text{від } 0,75 \cdot 10^{-2} \text{ м/с до } 2 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}$$

при постійному значенні $P_1 = 65 \text{ Вт}$;

– для функціональної моделі (2) діапазон зміни потужності P дорівнює

$$\text{від } 49 \text{ Вт до } 99 \text{ Вт}$$

при постійному значенні $V_1 = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}$,

що мають вигляд відповідно:

$$b_1(V) = -0,1138 V^3 + 0,8768 V^2 - 2,4432 V + 2,8669; \quad (2.8)$$

$$b_1(P) = -0,000007P^3 + 0,0007P^2 + 0,0141P - 0,7589. \quad (2.9)$$

На основі математичних моделей (2.8), (2.9) апроксимуючої сплайн-функції для залежностей $b_1(V)$ і $b_1(P)$ побудовано знакові моделі для зразка № 1, які зображено на рис. 2.4 і 2.5 відповідно.

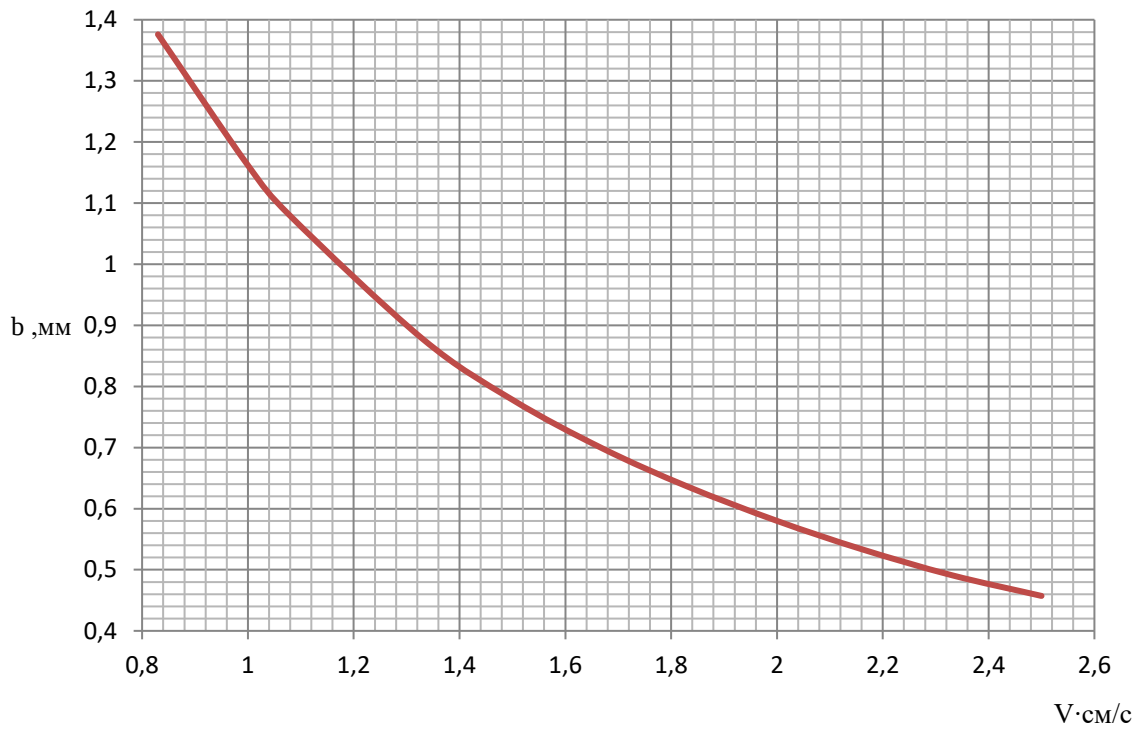


Рис. 2.4. Залежність геометричних розмірів шовного з'єднання b від швидкості V переміщення лазерного випромінювання відносно заготовки, яка обробляється, для зразка № 1

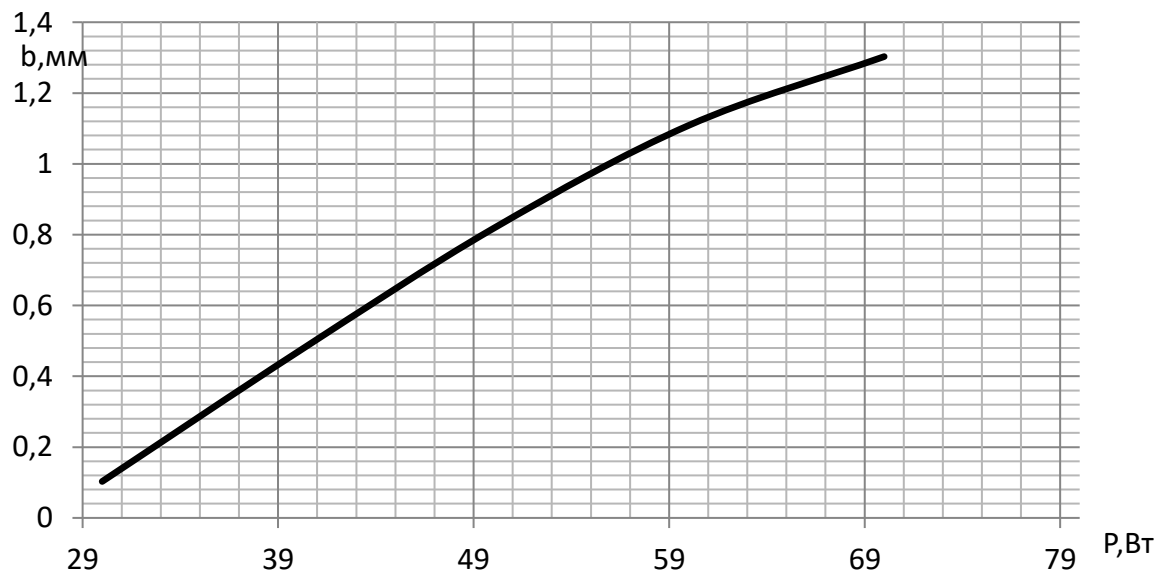


Рис. 2.5. Залежність геометричних розмірів шовного з'єднання b від потужності P лазерного випромінювання для зразка № 1

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

– для моделі (1) діапазон зміни швидкості V дорівнює

$$\text{від } 0,75 \cdot 10^{-2} \text{ м/с до } 2 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}$$

при постійному значенні $P_2 = 55$ Вт;

– для моделі (2) діапазон зміни потужності P дорівнює

$$\text{від } 49 \text{ Вт до } 99 \text{ Вт}$$

при постійному значенні $V_2 = 0,8 \cdot 10^{-2}$ м/с,

що мають вигляд відповідно:

$$b_2(V) = -0,0805 V^3 + 0,4831 V^2 - 1,2087 V + 1,5782; \quad (2.10)$$

$$b_2(P) = -0,000015P^3 - 0,0034P^2 + 0,256P - 5,6046. \quad (2.11)$$

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 рис. 2.6 і 2.7 відповідно.

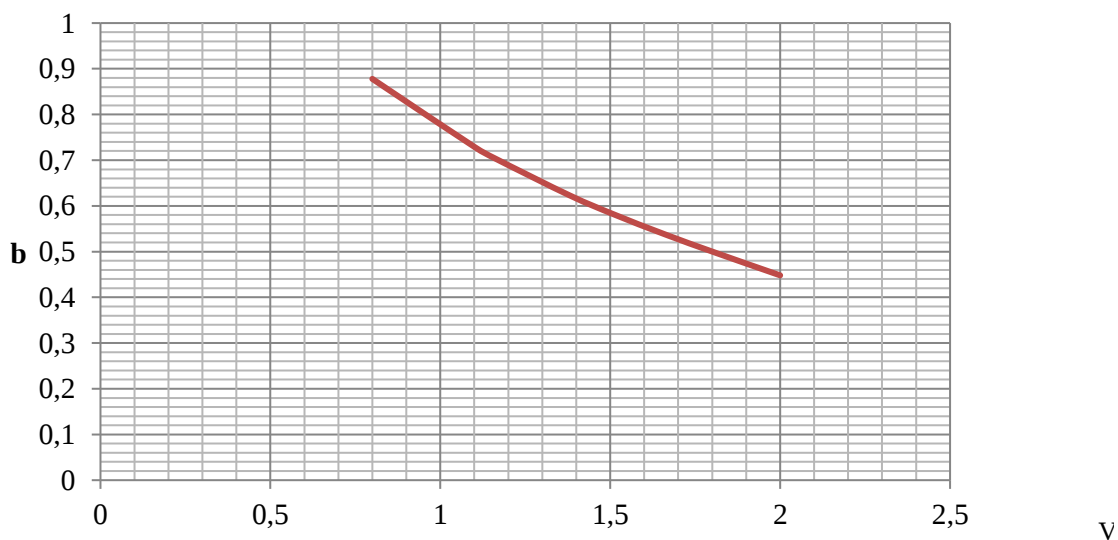


Рис. 2.6. Залежність геометричних розмірів шовного з'єднання b від швидкості переміщення лазерного випромінювання відносно заготовки, що обробляється, для зразка № 2

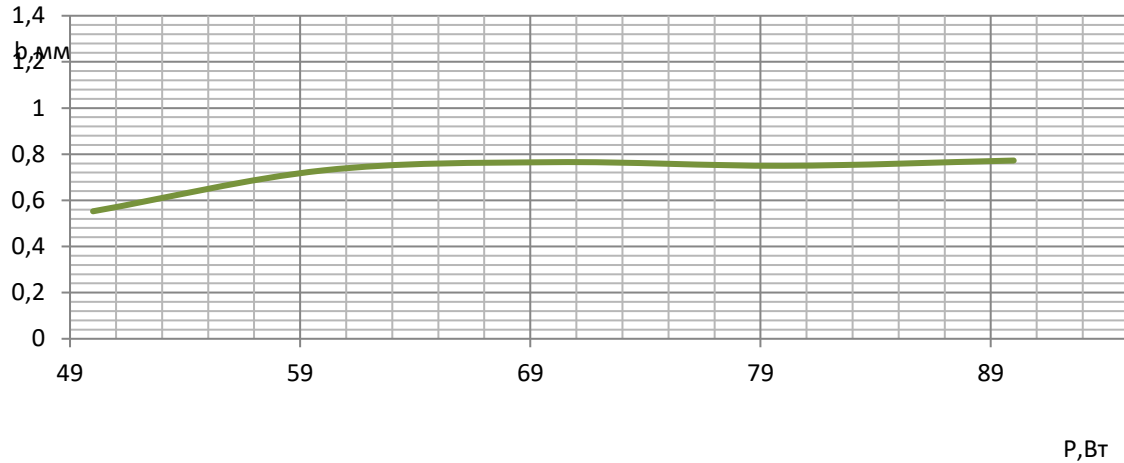


Рис. 2.7. Залежність геометричних розмірів шовного з'єднання b від потужності лазерного випромінювання для зразка № 2

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 дорівнює

$$\text{від } 0,75 \cdot 10^{-2} \text{ м/с до } 2 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}$$

при постійному значенні $P_3 = 60$ Вт;

– для моделі (2) діапазон зміни потужності P дорівнює

$$\text{від } 49 \text{ Вт до } 99 \text{ Вт}$$

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

що мають вигляд відповідно:

$$b_3(V) = -0,1895 V^3 + 0,7943 V^2 - 1,2602 V + 1,3475; \quad (2.12)$$

$$b_3(P) = 0,000006P^3 - 0,0014P^2 + 0,1111P - 2,3337. \quad (2.13)$$

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 рис. 2.8 і 2.9 відповідно.

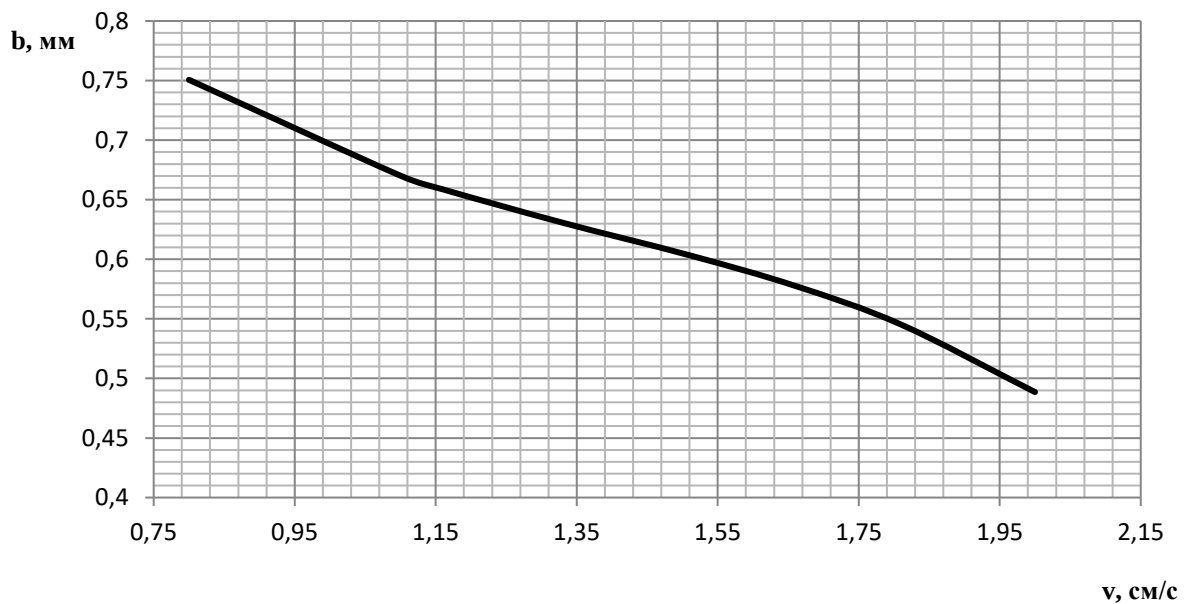


Рис. 2.8. Залежність геометричних розмірів шовного з'єднання b від швидкості переміщення лазерного випромінювання відносно заготовки, що обробляється, для зразка № 3

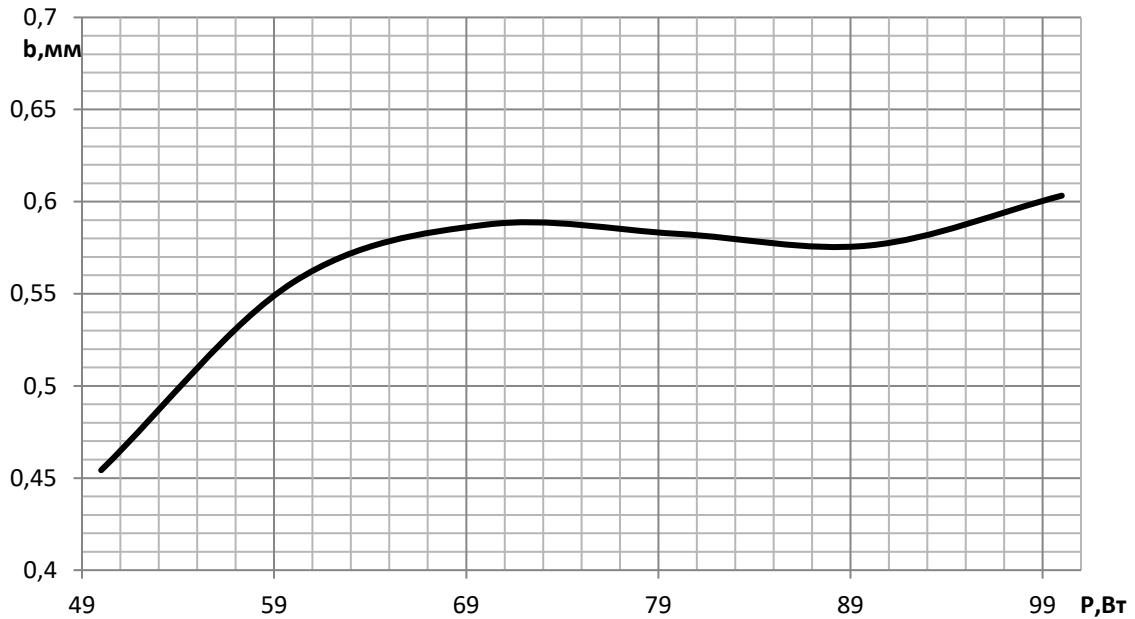


Рис. 2.9. Залежність геометричних розмірів шовного з'єднання b від потужності лазерного випромінювання для зразка № 3

Інформація, яку зображено на рис. 2.5; 2.7; 2.9, візуально представляє залежність геометричних розмірів шовного з'єднання b від потужності лазерного випромінювання для зразків № 1, № 2, № 3, показує наявність точки перегину, при якій у відповідному діапазоні залишається майже постійним значення шва b при подальшому збільшенні потужності.

Отже, побудована спеціалізована інформаційна база знань на основі реляційних відношень параметрів режимів лазерного зварювання металів за результатами експериментального дослідження шляхом встановлення інформаційних залежностей між цими параметрами, за допомогою апроксимуючих сплайн-функцій сукупність, яких представлена в табл. 2.3.

Таблиця 2.3

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

Це забезпечило можливість розробити графоаналітичні методи, які представлені нижче.

2.4 Графоаналітичні методи визначення кращих параметрів режимів для автоматизованого лазерного зварювання в умовах дії непередбачених факторів

2.4.1 Графоаналітичний метод побудови знакових моделей в єдиному квадранті

Пропонується графоаналітичний метод визначення кращих параметрів, який створений, використовуючи розроблену інформаційну спеціалізовану базу знань та відповідні математичні моделі функціональних залежностей між геометричними розмірами шовного з'єднання b , швидкістю V і потужністю P режимів автоматизованого лазерного зварювання на основі апроксимації сплайн-функцій (табл. 2.3).

Представлення математичних моделей (ММ) апроксимуючих сплайн-функцій дозволило побудувати знакові моделі у єдиному квадранті та визначити кращі значення V , P і b одночасно (приклади представлені на рис. 2.11, рис. 2.12, рис. 2.13).

Отже, графоаналітичний метод визначення кращих значень V , P і b одночасно базується на: використанні теорії інформаційної технології при створенні інформаційної спеціалізованої бази знань за результатами експериментального дослідження; принципі параметричної оптимізації; принципі прийняття рішень в умовах дії непередбачених факторів, що ґрунтуються на побудови знакових моделей за результатами сформованих:

- схем відношень швидкості лазерного зварювання і ширини зварного шва при постійному значенні потужності лазерного випромінювання;
- схем відношень потужності лазерного випромінювання і ширини зварного шва при постійному значенні швидкості лазерного зварювання;
- синтезованих схем відношень знакових моделей до 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 рис. 2.11, рис. 2.12, рис. 2.13, рис. 2.14, де зображено знакові моделі залежностей $V(b)$ і $P(b)$ для зразків № 1, № 2, № 3 відповідно, де загальною абсцисою є значення b .

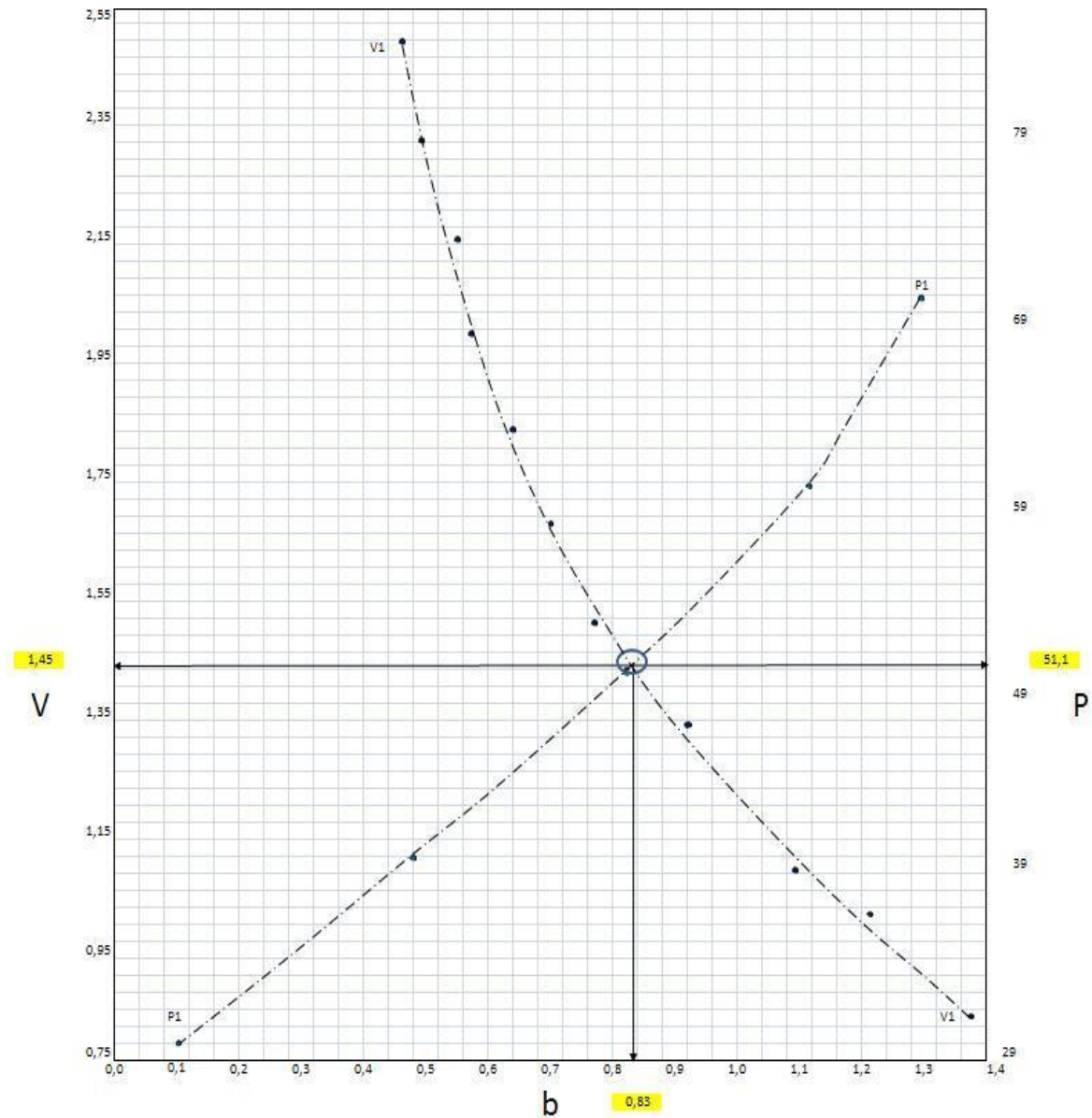


Рис. 2.11. Графіки визначення кращих параметрів процесу лазерного зварювання тонкостінних конструкцій зі сталі 12X18H10T для зразка № 1

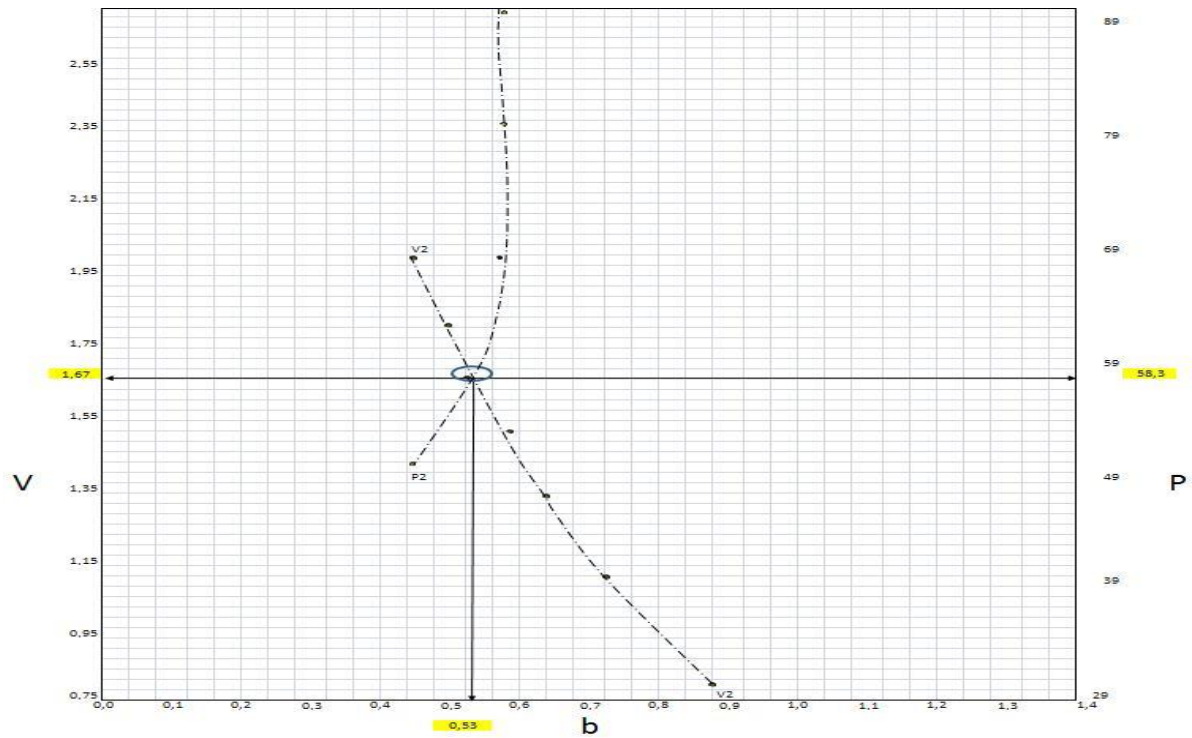


Рис. 2.12. Графіки визначення кращих параметрів процесу лазерного зварювання тонкостінних конструкцій зі сталі 1,4541 для зразка № 2

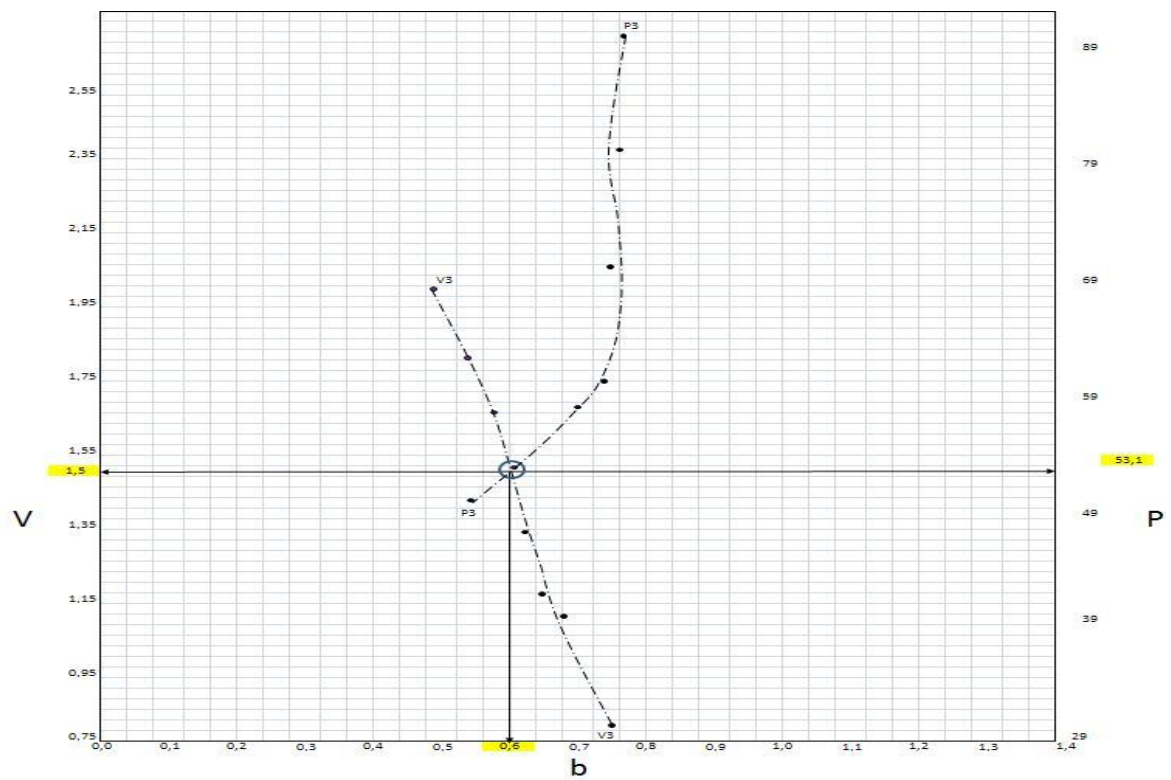


Рис. 2.13. Графіки визначення кращих параметрів процесу лазерного зварювання тонкостінних конструкцій зі сталі 1,4541 для зразка № 3

Алгоритм визначення кращих відповідних параметрів режиму лазерного зварювання здійснюється 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 оптимальним параметрам:

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

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

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

Синтез знакових моделей залежностей $V(b)$ і $P(b)$ для зразків № 1, № 2, № 3, де загальною абсцисою є значення b , зображено на рис. 2.14.

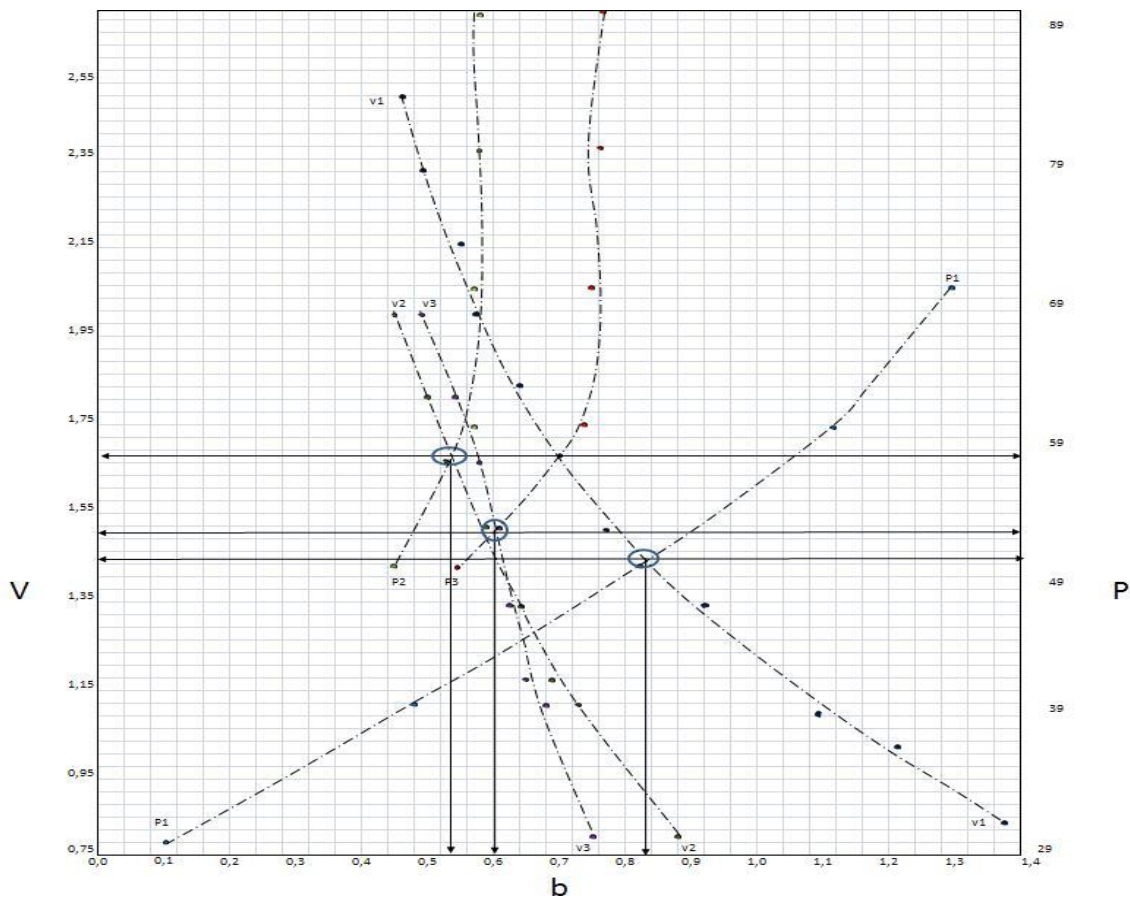


Рис. 2.14. Графік визначення кращих значень параметрів за відповідними залежностями $V(b)$, $P(b)$ та b для зразків № 1, № 2, № 3

Інформація у вигляді синтезованого графічного представлення знакових моделей залежностей $V(b)$, $P(b)$ та b для зразків № 1, № 2, № 3 має наступні переваги:

- при збереженні на відповідному підприємстві зменшує об'єм пам'яті;
- прийом цієї інформації прискорюється майже на 3, 4 порядки;
- легкість освоєння;
- створення для подальшого використання спеціалізованої інформаційної бази знань.

Крім того за допомогою розглянутого графоаналітичного методу одночасно визначаються кращі значення наступних параметрів:

- ширину зварного шва;
- швидкість зварювання;
- потужність лазерного випромінювання в умовах дії непередбачених факторів.

При цьому апроксимуючи сплайн-функції при збереженні мають:

- малий об'єм пам'яті;
- забезпечують легкість використання їх при аналізі;
- можливість прогнозування.

2.4.2 Графоаналітичний метод побудови знакових моделей за двома квадрантами

Запропоновано **другий** графоаналітичний **метод** [1–2] визначення кращих параметрів режимів лазерного зварювання, який відрізняється тим, що у технічному завданні на розробку тонкостінної конструкції введено обмеження по геометричному розміру шовного з'єднання b .

Особливість алгоритму *другого* графоаналітичного методу полягає в побудові залежностей (рис. 2.10) у двох квадрантах з однією загальною

ординатою b , тобто будуються знакові моделі отриманих функціональних залежностей відповідно до математичних моделей $b_o(V)$ та $b_a(P)$ у двох квадрантах, де загальною ординатою значення ширини зварного шва b є:

$$b_o(V) \text{ при } P = \text{const};$$

$$b_a(P) \text{ при } V = \text{const}.$$

Алгоритм визначення відповідних параметрів режимів V та P за наведеними графіками здійснюється в наступній послідовності:

– встановлюється задане значення ширини зварного шва (ординати)

$$b = c ;$$

– проводиться з точки (c) пряма лінія, що паралельна осі абсцис, до перетину зі сплайн-функціями:

$$b_o(V) \text{ і } b_a(P);$$

– з точок перетину прямої та сплайн-функцій $b_o(V)$ і $b_a(P)$ опускається перпендикуляр на відповідні осі абсцис (P) і (V) ;

– точки перетину перпендикуляра з відповідними абсцисами визначають потрібні значення режимів (V) і (P) .

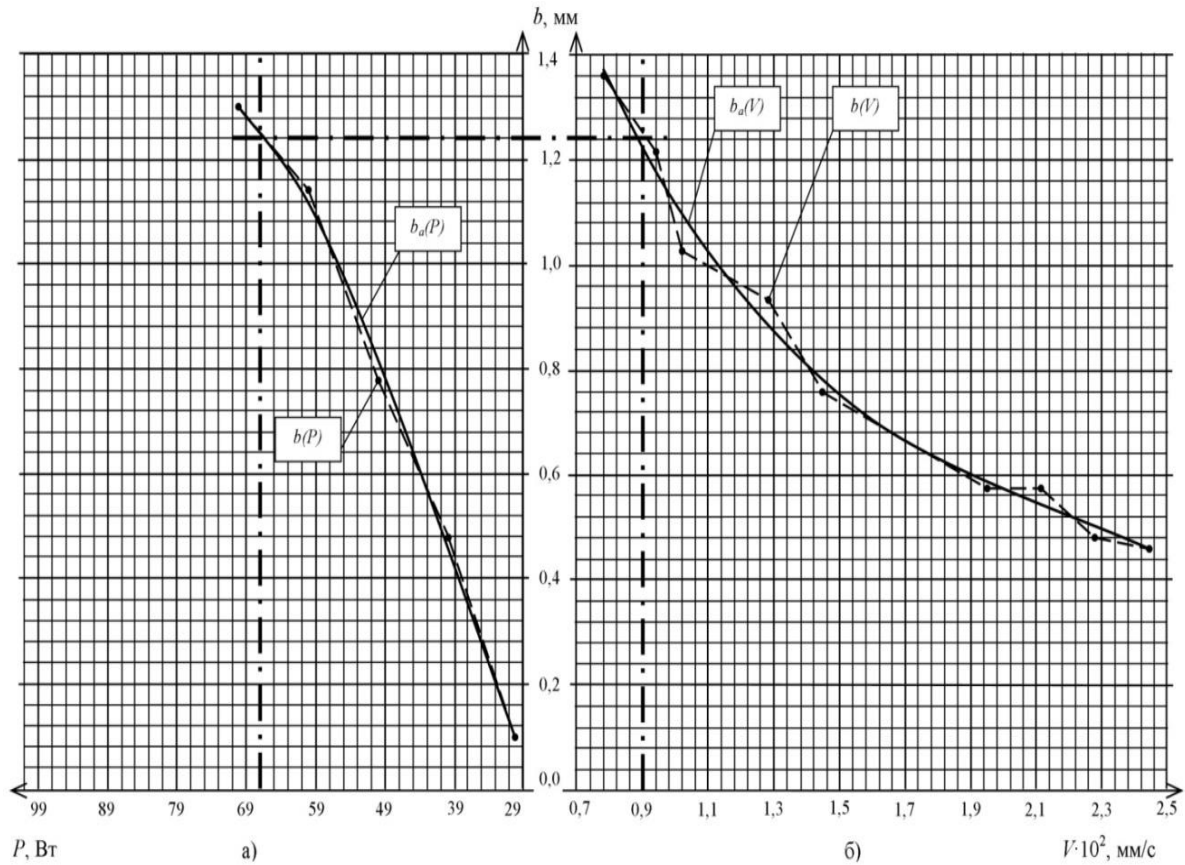


Рис. 2.10. Залежність значення ширини зварного шва:

а) від потужності випромінювання P ;

б) від швидкості лазерного зварювання V

Отже, для $b = 1,24$ мм необхідно встановити такі значення режимів:
 $V = 0,9 \cdot 10^2$ мм/с; $P = 67$ Вт.

2.5 Верифікація відповідності між експериментальними даними та математичними моделями

Верифікація отриманих результатів здійснюється за допомогою методів обчислювальної математики: методів Кардано та Кардано-Вієта [14–15].

Залежність $b(V)$ (табл. 2.3):

$$- 0,1138 V^3 + 0,8768 V^2 - 2,4432 V + 2,8669 = 0,84.$$

Рішення:

$$V^3 - 7,7047 V^2 + 21,4692 V - 17,811 = 0.$$

Отримавши рівняння виду

$$ax^3 + bx^2 + cx + d = 0 \quad (a = 1), \quad (2.14)$$

виконуємо заміну

$$V = x - b/3a.$$

Одержимо рівняння виду

$$x^3 + px + q = 0,$$

де $p = (3ac - b^2)/3a^2$;

$$q = (2b^3 - 9abc + 27a^2d)/27a^3.$$

Рішення:

$$p = (3ac - b^2)/3a^2 = (3 \cdot 21,4692 - (-7,7047)^2)/3 = 1,6817;$$

$$\begin{aligned} q &= (2b^3 - 9abc + 27a^2d)/27a^3 = \\ &= (2 \cdot (-7,7047)^3 - 9 \cdot (-7,7047) \cdot 21,4692 + 27 \cdot (-17,811)^2)/27 = 3,4477. \end{aligned}$$

Отже,

$$x^3 + 1,6817x + 3,4477 = 0.$$

Враховуємо, що

$$D = (p/3)^3 + (q/2)^2;$$

$$D = (p/3)^3 + (q/2)^2 = 0,1761 + 2,9717 = 3,1478.$$

Оскільки $D > 0$, то рівняння має один дійсний і два комплексні корені. Знайдемо лише дійсний корінь, оскільки шукане значення є дійсним.

$$u = \sqrt[3]{-q/2 + \sqrt{D}} = \sqrt[3]{-1,72385 + 1,7742} = \sqrt[3]{0,05035} = 0,3693;$$

$$v = \sqrt[3]{-q/2 - \sqrt{D}} = \sqrt[3]{-1,72385 - 1,7742} = \sqrt[3]{-3,49805} = -1,518;$$

$$x_1 = u + v = 0,3693 - 1,518 = -1,1487$$

$$V_1 = x_1 - b/3a = -1,1487 + 7,7047/3 = -1,1487 + 2,5682 = \mathbf{1,42}.$$

Таким чином, $V_1 = 1,42$.

Визначення оптимального значення, використовуючи залежність $b(P)$ і метод Кардано-Вієта:

$$- 0,000007 P^3 + 0,0007 P^2 + 0,0141 P - 0,7589 = 0,84;$$

$$P^3 - 100 P^2 - 2014,2857 P + 228414,2857 = 0.$$

Отримавши рівняння виду

$$x^3 + ax^2 + bx + c = 0,$$

маємо:

$$Q = (a^2 - 3b)/9 = ((-100)^2 - 3*(-2014,2857))/9 = 1782,5397;$$

$$R = (2a^3 - 9ab + 27c)/54 =$$

$$= (2*(-100)^3 - 9*(-100)(-2014,2857) + 27*228414,2857)/57 = 43598,677;$$

$$S = Q^3 - R^2 = 3763082180.$$

Оскільки

$$S > 0, Q > 0,$$

то рівняння має три дійсні корені.

$$t = \arccos(R/\sqrt{Q^3})/3 =$$

$$= \arccos(43598,677/\sqrt{5663926816})/3 = \arccos(0,5793)/3 = 18,2;$$

$$P_1 = -2*\sqrt{Q}*\cos(t) - a/3 =$$

$$= -2*\sqrt{1782,5397}*\cos(18,2) + 100/3 = -80,2156 + 33,33 = -46,8856;$$

$$P_2 = -2*\sqrt{Q}*\cos(t + 2\pi/3) - a/3 =$$

$$= -2*\sqrt{1782,5397}*\cos(138,2) + 100/3 = 62,95 + 33,33 = 96,28;$$

$$P_3 = -2*\sqrt{Q}*\cos(t - 2\pi/3) - a/3 =$$

$$= -2*\sqrt{1782,5397}*\cos(101,8) + 100/3 = 17,2676 + 33,33 = 50,6.$$

Таким чином, $P_3 = 50,6$.

Для прискорення оптимального параметричного аналізу на рис. 2.15 зображено їх значення через гістограми.

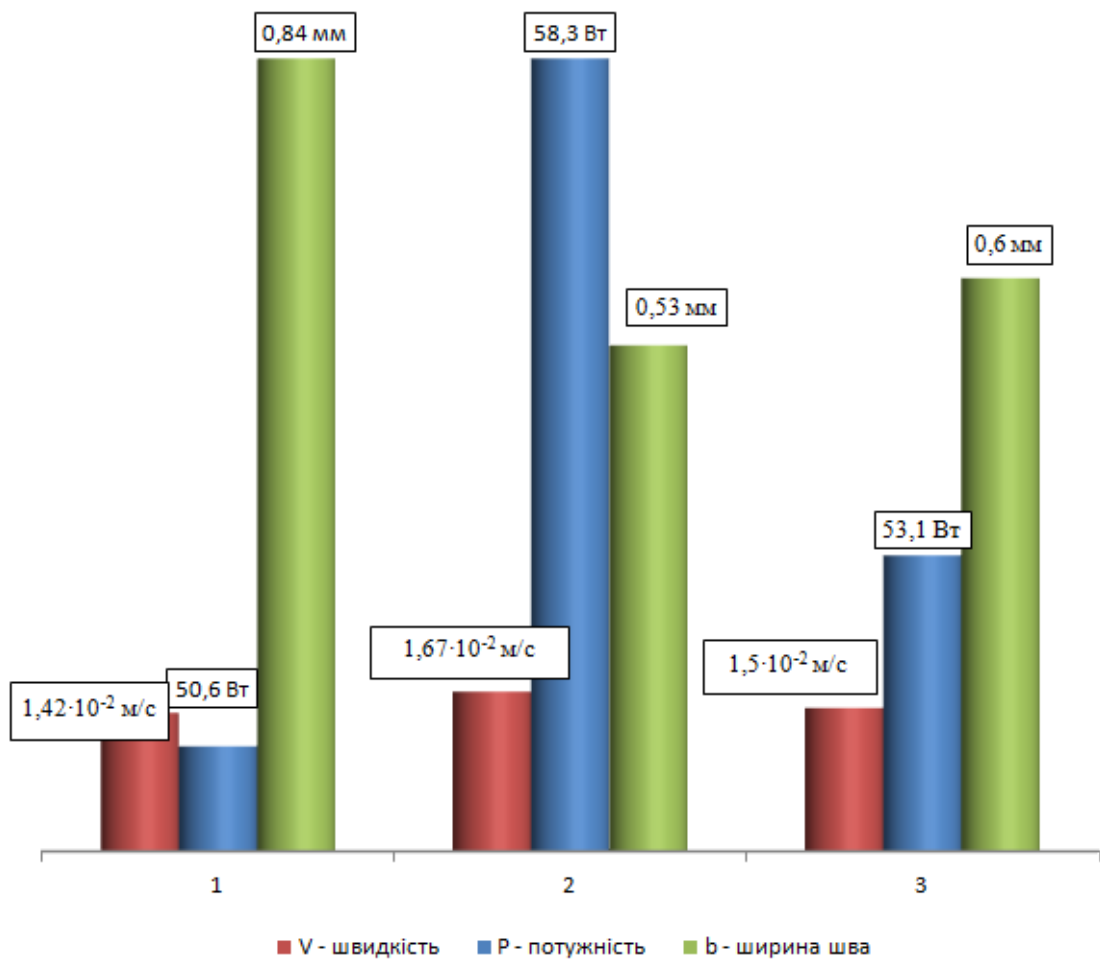


Рис. 2.15. Гістограми оптимальних параметрів V , P режимів лазерного

зварювання та ширини зварного шва b для зразків № 1, № 2, № 3

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 відношень до відповідних типу сталі та товщини конструкції, що зварюється встик, на відповідному підприємстві.

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

Висновки до розділу 2

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 кращих інформаційних значень параметрів режимів управління процесом з'єднання тонкостінних конструкцій та візуалізацію їх результатів для прискорення цієї процедури в умовах дії непередбачених факторів.

Це забезпечує 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, особливо це відчутно при дрібносерійному виробництві і, як наслідок, вартість виробу знижується майже на 50 %.

Реалізація спеціалізованої інформаційної бази знань на основі схеми відношень параметрів режимів лазерного зварювання металів за результатами експериментальних досліджень в умовах дії непередбачених факторів та візуалізація графіків залежностей цих параметрів, побудованих на основі створених графоаналітичних методів, дають можливість прискорити процес прийому інформації на 3 ..., 4 порядки.

Особливість методів полягає в прийнятті рішень в умовах дії непередбачених факторів шляхом збору інформації за результатами

експериментальних досліджень, обробки, зберігання та створенні спеціалізованої інформаційної бази знань.

Особливістю цих методів є простота, наочність, доступність для розуміння користувачем, вони не вимагають багато часу і високої кваліфікації робітника для їх освоєння, що значно скорочує процес визначення інформації за відповідними параметрами зварювання і знижує собівартість виробу.

Проведено верифікацію отриманих результатів за допомогою коректного застосування математичного апарату, що базується на застосуванні методів обчислювальної математики, на основі якої підтверджено правильність отриманих результатів через збіги теоретичних і графічних значень кращих параметрів режимів зварювання, що побудовані за результатами експериментального дослідження.

Список використаних джерел до розділу 2

- [1] Д. А. Гардер «Інформаційна технологія параметричної оптимізації режимів автоматизованого лазерного зварювання в умовах невизначеності» *Вісник ЧДТУ*. Черкаси: ЧДТУ, 2021.
- [2] 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.
- [3] Д. А. Лукашенко, В. Д. Шелягин, А. Г. Лукашенко, А. В. Бернацкий, В. П. Гаращук и В. И. Луценко, "Лазерная сварка тонколистовой нержавеющей стали", *Автоматическая сварка*, № 4, с. 45-49, 2011.
- [4] В. В. Лимаренко, И. П. Хавина, и А.Н. Рисованный, "Постановка и решение задачи параметрической оптимизации операций резания металлов и обработки материалов", *Системи управління, навігації та зв'язку*, Полтава, вип. 4 (44), с. 20-24, 2017.

- [5] В. В. Лимаренко, и И. П. Хавина, "Решение задачи оптимизации параметров обработки металлов при операции точения", *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*, Харків, вип. 3 (83), с. 77-86, 2017.
- [6] А. В. Бернацький, В. Д. Шелягін, О. В. Сиора, В. М. Сидорець, та О. М. Берднікова, "Вплив просторового положення при лазерному зварюванні на рівень якості зварних з'єднань зі сталі AISI 321", *Автоматичне зварювання*, № 1, с. 15-24, 2020.
- [7] A. Artinov, N. Bakir, M. Bachmann, A. Gu-menyuk, and M. Rethmeier, "Weld pool shape observation in high power laser beam welding". *Procedia CIRP*, no. 74, pp. 683-686, 2018.
- [8] В. М. Нестеренков, Л. А. Кравчук, та М. О. Русиник, "Вплив технологічних і металургійних факторів на формування зварних з'єднань міді при електронно-променевому зварюванні", *Автоматичне зварювання*, № 2, с. 38-42, 2021. Лазерная сварка
- [9] 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.
- [10] В. Ю. Хаскін, В. М. Коржик, Ч. Донг, та Є. В. Ілляшенко, "Підвищення ефективності лазерного зварювання шляхом зворотно-поступального переміщення фокуса", *Автоматичне зварювання*, № 1, с. 57-63, 2020.
- [11] Кини Р. Принятие решения при многих критериях предпочтения и замещения / Р. Кини, Х. Хайфа. М.: Радио и связь, 1981. – 560 с.
- [12] Волкович В.Л. Методы принятия решений по множеству критериев оптимальности. М.: Наука, 1980. – 208 с.
- [13] Принцип многокритериальной оптимизации параметров морфоструктур преобразователей кодовой информации В.М. Лукашенко, М.Г. Лукашенко, Я.В. Корпань и др. // Тр. 10-й Междунар. конф. По

автоматическому управлению (Автоматика-2003) – Севастополь : СевНТУ, 2003. – Т1. – С. 63-64.

[14] Г. Корн Справочник по математике для научных работников и инженеров: Определения, теоремы, формулы / Г. Корн – М. : 2013. – 832 с.

[15] Корн Г. Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М., 1984.

РОЗДІЛ 3

УДОСКОНАЛЕННЯ БАЗИ ЗНАНЬ ЧЕРЕЗ СХЕМИ ВІДНОШЕНЬ МЕТОДІВ УПРАВЛІННЯ КРИСТАЛІЗАЦІЄЮ МЕТАЛУ ТА ЗОБРАЖЕНЬ ЙОГО МІКРОСТРУКТУРИ

У третьому розділі 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, керуючи 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.

3.1 Основні показники якісного оцінювання з'єднання тонкостінних конструкцій

Основними показниками якісного оцінювання з'єднання тонкостінних конструкцій є:

- геометричні розміри зварного шва;
- механічні властивості з'єднання (мікротвердість, розподіл основних компонентів у структурі зварного шва);
- наявність внутрішніх і зовнішніх дефектів;
- дрібнозернистість;
- однорідність макро-, мікроструктури зварного шва і колошовної зони.

Останнім часом значного поширення набув метод зовнішнього імпульсно-періодичного впливу із застосуванням як джерела тепла лазерного випромінювання [1, 3–8, 15, 16, 17].

Фізичні процеси, що відбуваються в зварювальній ванні є вкрай складними [2, 9–14].

Відсутність строгих математичних моделей процесу, швидкоплинність теплових процесів обумовлюють проведення досліджень на основі комплексного підходу шляхом поєднання якісних показників, експериментів, локального моделювання з теоретичним обґрунтуванням.

3.2 Методи управління кристалізацією литого металу та його схеми відношень зображень мікроструктури

Основні параметри режимів зварювання визначаються нормативними документами і, як правило, є в технічній документації до зварювального обладнання.

Корегування параметрів для найкращого режиму зварювання тонкостінних конструкцій здійснюється методом підбору швидкості

лазерного зварювання і потужності лазерного випромінювання, враховуючи фізико-хімічні властивості матеріалів, що зварюються, середовище, використовуване обладнання, пристосування, зварювальний і вимірювальний інструменти.

Однак цей процес є досить тривалим і вимагає зберігання великого обсягу бази даних для різних зварювальних матеріалів. Усунення цього недоліку є першочерговим завданням.

У дисертаційній роботі запропоновано інформаційну технологію, що базується на трьох методах управління кристалізацією литого металу [11–14, 17].

3.2.1 Перший метод управління кристалізацією литого металу та відображення макро-, мікроструктур зварного шва колошовної зони

Відомо, що для визначення технологічних параметрів, які забезпечують найкращі умови створення дрібнозернистої структури металу шва, лазерне зварювання здійснюється модульованим випромінюванням складної форми (рис. 3.1) та додатково шляхом зміни частоти проходження модульованих лазерних імпульсів.

Особливістю форми імпульсів є наступне:

- крутий передній фронт ($0 - t_1$);
- плавно спадаючий задній фронт, якій має дві ділянки:
 - перша верхня ділянка ($t_1 - t_2$) забезпечує плавлення матеріалу без інтенсивного випаровування;
 - друга ділянка ($t_2 - t_3$) має нахил, зміна кута якого дає змогу змінювати швидкість кристалізації, водночас тривалість ділянки визначає оптимальний ступінь переохолодження металів, що зварюються.

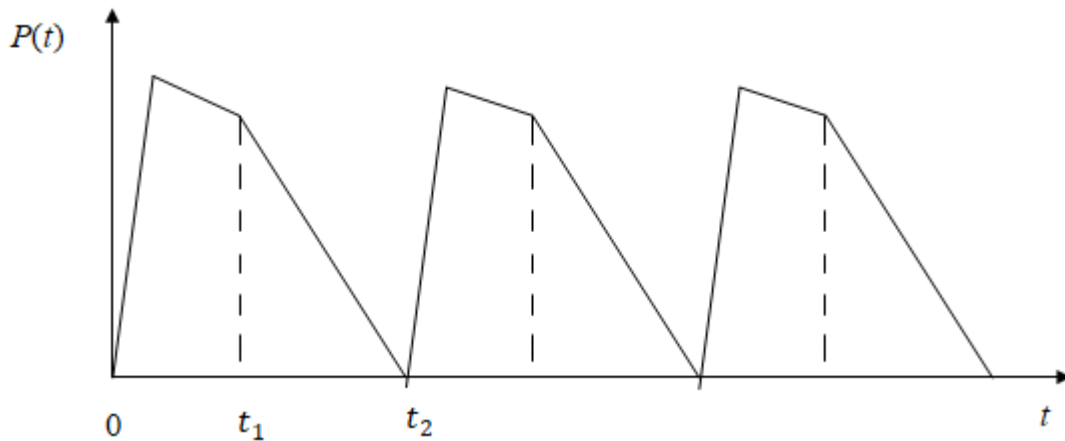


Рис. 3.1. Форма імпульсно-періодичного модулюючого сигналу лазерного випромінювання

Суть методу управління кристалізацією полягає у тому, що локальне плавлення металу модульованим імпульсом лазерного випромінювання, форму якого зображено на рис. 3.1 [14–17], забезпечує утворення дрібнозернистої структури зварного шва за рахунок створення умови зародження максимальної кількості центрів кристалізації (ЦК) при мінімізації лінійної швидкості росту кристалів (ЛШРК) для металу, що зварюється [14, 16], тобто умови можна записати наступним чином:

$$\max \text{ЦК при } \min \text{ЛШРК.} \quad (4.1)$$

Крім того, в роботах [14, 16, 17] запропоновано додатково впливати на процес формування в литому металі умови (4.1) через зміну частоти проходження модульованих лазерних імпульсів складною конфігурацією.

Верифікація запропонованого методу проведена на основі комп'ютерно-експериментального моделювання.

3.2.1.1 Програма та методика зварювання тонкостінних конструкцій

Програма призначена для виявлення значень частоти проходження модулюючих імпульсів складної форми [14, 17, 21], яка забезпечує відповідну якість макро-, мікроструктур зварного з'єднання тонкостінних конструкцій через управління впливом теплового потоку на метал шва та колошовної зони з'єднання тонкостінних конструкцій.

У програмі для зварювання тонколистових конструкцій із нержавіючої сталі прийнято значення наступних даних:

$$a := 0.063 \text{ [см}^2\text{/с]} \quad \eta := 0.650 \quad f := 2000 \text{ [Гц];}$$

$$V1 := 200 \text{ [мм/мин]} \quad c_\rho := 4.75 \text{ [Дж/(см}^3\text{K)]} \quad \lambda := 0.25 \text{ [Вт/(см K)];}$$

$$r := 0.0015 \text{ [см]} \quad T_\rho := \frac{1}{f} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ [с]} \quad x := 0.00268 \text{ [см];}$$

$$y := 0.00268 \text{ [см]} \quad \delta := 0.02 \text{ [см]} \quad b := 2 \frac{\alpha_T}{c_\rho \cdot \delta};$$

$$t_\rho := T_\rho - t_i \quad \tau := 0, \frac{(T_\rho)}{50} .. 7T_\rho \quad \alpha_T := 5 \cdot 10^{-3} \text{ [Вт/(см}^2\text{K)];}$$

$$q1 := 100 \text{ [Вт]} \quad q := q1 \cdot \eta = 65 \text{ [Вт]} \quad q3 := 00 \text{ [Вт];}$$

$$V := \frac{V1}{600} = 0.333 \text{ [см/с]} \quad t_i := T_\rho \cdot 0.13.$$

$$\Delta T_{11}(t) := \int_0^t \frac{q}{c_\rho \cdot \delta(4\pi \cdot a \cdot t)} \cdot e^{-\frac{(x+V \cdot t)^2 + y^2}{4a \cdot t} - b \cdot t} dt$$

$$q_{sr} := \frac{\left(q \cdot t_i + q \cdot \frac{t_\rho}{2} \right)}{T_\rho} = 36.725 [\text{B}\tau]$$

$$\Delta T_{sr}(t) := \int_0^t \frac{q_{sr}}{c_\rho \cdot \delta(4\pi \cdot a \cdot t)} \cdot e^{-\frac{(x+V+t)^2 + y^2}{4a \cdot t} - b \cdot t} dt$$

$$q_2(t) := q_3 + \frac{q}{t_\rho} \cdot t$$

$$\Delta T_{12}(t) := \int_0^t \frac{q_2(t)}{c_\rho \cdot \delta(4\pi \cdot a \cdot t)} \cdot e^{-\frac{(x+V \cdot t)^2 + y^2}{4a \cdot t} - b \cdot t} dt ;$$

$$\Delta T_{12}(t) := \text{if}(t < t_i, 0, \Delta T_{12}(t - t_i))$$

$$\Delta T \Sigma 1(t) := \Delta T_{11}(t) - \Delta T_{12}(t) \quad k_{sf1} := 0.4475$$

$$\Delta T_{21}(t) := \Delta T_{11}(t - T_\rho + k_{sf1} \cdot T_\rho) \quad \Delta T_{11}(k_{sf1} T_\rho) = 883.509$$

$$\Delta T \Sigma 2(t) := \Delta T_{21}(t) - \Delta T_{12}(t - T_\rho) \quad \Delta T \Sigma(T_\rho) = 888.299$$

$$\Delta T \Sigma 1(t) := \text{if}(t - T_\rho, \Delta T \Sigma 1(t), \Delta T \Sigma 2(t))$$

$$\Delta T \Sigma 2(t) := \text{if}(t - T_\rho, \Delta T \Sigma 1(t), \Delta T \Sigma 2(t))$$

$$\Delta T_{31}(t) := \Delta T_{11}(t - T_\rho + k_{sf2} \cdot T_\rho)$$

$$\Delta T \Sigma 3(t) := \Delta T_{31}(t) - \Delta T_{12}(t - T_\rho) \quad k_{sf2} := 0.676$$

$$\Delta T \Sigma 3(t) := \text{if}(T_\rho < t < 2T_\rho, \Delta T \Sigma 2(t), \Delta T \Sigma 3(t)) \quad \Delta T \Sigma 2(2T_\rho) = 1.177 \cdot 10^3$$

$$\Delta T \Sigma 2(t) := \text{if}(t < 2T_\rho, \Delta T \Sigma 2(t), \Delta T \Sigma 3(t)) \quad \Delta T_{11}(k_{sf2} \cdot T_\rho) = 1.171 \cdot 10^3$$

$$\Delta T \Sigma 1(t) := \text{if}(t < 2T_\rho, \Delta T \Sigma 1(t), \Delta T \Sigma 3(t))$$

$$\Delta T 41(t) := \Delta T 11(t - 3T_\rho + k_{sf3} \cdot T_\rho)$$

$$\Delta T \Sigma 4(t) := \Delta T 41(t) - \Delta T 12(t - 3T_\rho) \quad k_{sf3} := 0.791$$

$$\Delta T \Sigma 4(t) := \text{if}(2T_\rho < t < 3T_\rho, \Delta T \Sigma 3(t), \Delta T \Sigma 4(t)) \quad \Delta T \Sigma 3(3T_\rho) = 1.294 \cdot 10^3$$

$$\Delta T \Sigma 3(t) := \text{if}(t < 3T_\rho, \Delta T \Sigma 3(t), \Delta T \Sigma 4(t)) \quad \Delta T 11(k_{sf3} \cdot 3T_\rho) = 1.286 \cdot 10^3$$

$$\Delta T \Sigma 2(t) := \text{if}(t < 2T_\rho, \Delta T \Sigma 2(t), \Delta T \Sigma 4(t))$$

$$\Delta T \Sigma 1(t) := \text{if}(t < T_\rho, \Delta T \Sigma 1(t), \Delta T \Sigma 4(t))$$

$$\Delta T 51(t) := \Delta T 11(t - 4T_\rho + k_{sf4} \cdot T_\rho)$$

$$\Delta T \Sigma 5(t) := \Delta T 51(t) - \Delta T 12(t - 4T_\rho) \quad k_{sf4} := 0.8488$$

$$\Delta T \Sigma 5(t) := \text{if}(3T_\rho < t < 4T_\rho, \Delta T \Sigma 4(t), \Delta T \Sigma 5(t)) \quad \Delta T \Sigma 4(4T_\rho) = 1.347 \cdot 10^3$$

$$\Delta T \Sigma 4(t) := \text{if}(t < 4T_\rho, \Delta T \Sigma 4(t), \Delta T \Sigma 5(t)) \quad \Delta T 11(k_{sf4} \cdot T_\rho) = 1.339 \cdot 10^3$$

$$\Delta T \Sigma 3(t) := \text{if}(t < 3T_\rho, \Delta T \Sigma 3(t), \Delta T \Sigma 5(t))$$

$$\Delta T \Sigma 2(t) := \text{if}(t < 2T_\rho, \Delta T \Sigma 2(t), \Delta T \Sigma 5(t))$$

$$\Delta T \Sigma 1(t) := \text{if}(t < T_\rho, \Delta T \Sigma 1(t), \Delta T \Sigma 5(t))$$

$$\Delta T 61(t) := \Delta T 11(t - 5T_\rho + k_{sf5} \cdot T_\rho)$$

$$\Delta T \Sigma 6(t) := \Delta T 61(t) - \Delta T 12(t - 5T_\rho) \quad k_{sf5} := 0.879$$

$$\Delta T \Sigma 6(t) := \text{if}(4T_\rho < t < 5T_\rho, \Delta T \Sigma 5(t), \Delta T \Sigma 6(t)) \quad \Delta T \Sigma 5(5T_\rho) = 1.372 \cdot 10^3$$

$$\Delta T \Sigma 5(t) := \text{if}(t < 5T_\rho, \Delta T \Sigma 5(t), \Delta T \Sigma 6(t)) \quad \Delta T 11(k_{sf5} \cdot T_\rho) = 1.365 \cdot 10^3$$

$$\Delta T \Sigma 4(t) := \text{if}(t < 4T_\rho, \Delta T \Sigma 4(t), \Delta T \Sigma 6(t))$$

$$\Delta T \Sigma 3(t) := \text{if}(t < 3T_\rho, \Delta T \Sigma 3(t), \Delta T \Sigma 6(t))$$

$$\Delta T \Sigma 2(t) := \text{if}(t < 2T_\rho, \Delta T \Sigma 2(t), \Delta T \Sigma 6(t))$$

$$\Delta T \Sigma 1(t) := \text{if}(t < T_\rho, \Delta T \Sigma 1(t), \Delta T \Sigma 6(t))$$

$$\Delta T 71(t) := \Delta T 11(t - 6T_\rho + k_{sf6} \cdot T_\rho)$$

$$\Delta T \Sigma 7(t) := \Delta T 71(t) - \Delta T 12(t - 6T_\rho) \quad k_{sf6} := 0.894$$

$$\Delta T \Sigma 7(t) := \text{if}(5T_\rho < t < 6T_\rho, \Delta T \Sigma 6(t), \Delta T \Sigma 7(t)) \quad \Delta T \Sigma 6(6T_\rho) = 1.386 \cdot 10^3$$

$$\Delta T \Sigma 6(t) := \text{if}(t < 6T_\rho, \Delta T \Sigma 6(t), \Delta T \Sigma 7(t)) \quad \Delta T 11(k_{sf6} \cdot T_\rho) = 1.378 \cdot 10^3$$

$$\Delta T \Sigma 5(t) := \text{if}(t < 5T_\rho, \Delta T \Sigma 5(t), \Delta T \Sigma 7(t))$$

$$\Delta T \Sigma 4(t) := \text{if}(t < 4T_\rho, \Delta T \Sigma 4(t), \Delta T \Sigma 7(t))$$

$$\Delta T \Sigma 3(t) := \text{if}(t < 3T_\rho, \Delta T \Sigma 3(t), \Delta T \Sigma 7(t))$$

$$\Delta T \Sigma 2(t) := \text{if}(t < 2T_\rho, \Delta T \Sigma 2(t), \Delta T \Sigma 7(t))$$

$$\Delta T \Sigma 1(t) := \text{if}(t < T_\rho, \Delta T \Sigma 1(t), \Delta T \Sigma 7(t))$$

$$\Delta T \Sigma 1(7T_\rho) = 1.392 \cdot 10^3 \quad T_{\max} := 1750 \quad T_{pl} := 1350 = 1.35 \cdot 10^3$$

Методика проведення комп'ютерно-експериментального дослідження процесу зварювання тонкостінних конструкцій

Поряд з традиційними процедурами методик комп'ютерно-експериментального дослідження процесу зварювання тонкостінних конструкцій, відмітною особливістю цієї методики є матеріали й апаратура для зварювання, механообробки та вимірювання.

Досліджували зварювання стрічок товщиною $\delta = 0,15$ мм і $\delta = 0,2$ мм зі сталей 12X18H10T і 1.4541 відповідно DIN EN 10028-7:2000, яка є близьким аналогом сталі 08X18H10T.

Зразки зварювалися за стандартною методикою на трьохкоординатному лазерному комплексі «АРМА-100М», особливостями якого є:

- ітербієвий волоконний одномодовий лазер ЛС-01-Б;

- потужність випромінювання – 100 Вт;
- діаметр серцевини – 10 мкм; характеристики пучка зображені на рис. 3.2 [14, 20].
- лазерне випромінювання фокусувалося на метал в пучок діаметром 40 мкм.

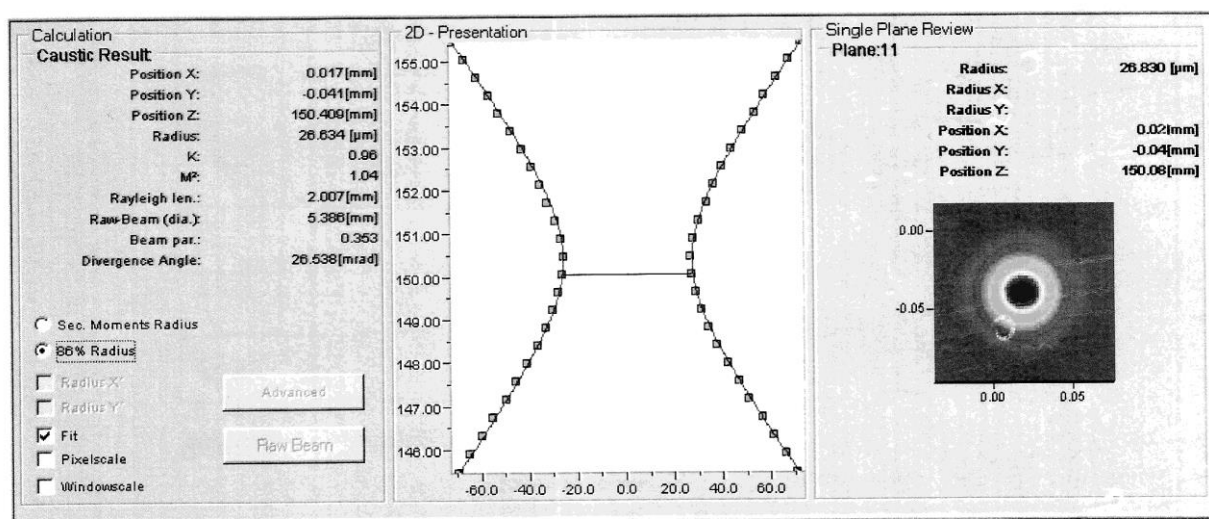


Рис. 3.2. Характеристики лазерного пучка лазера ЛС–01–Б

Як захисні гази використовувалися:

He – зверху;

Ar – знизу.

Досліджувалися як зварні стики, так і проплавлення по цілому листу металу.

При зварюванні по стикі листи вирізалися листовими ножицями з електроприводом MHSU 1000x2.0 фірми Schroeder Maschinenbau.

Пристосування, в якому стиковалися зварювані листи, забезпечувало мінімальну депланацію кромки.

Зразки для металографічного аналізу у вигляді шліфів поперечного перерізу зварних з'єднань готувалися за стандартною методикою з використанням шліфувально-полірувального верстата фірми Struers.

Мікроструктуру і хімічний склад основного металу та зварних з'єднань аналізували за допомогою оптичного мікроскопа Reichrt Polyvar Met і скануючого мікроскопа CamScan, оснащеного енергодисперсійною системою локального аналізу Energy 200.

Мікротвердість зварних з'єднань у поперечному перерізі шва вимірювали індентором Віккерса на мікроскопі Reichrt Polyvar Met при навантаженні 0,2 Н з кроком 50 мкм.

Міцність зварних з'єднань випробовувалася на розривній машині FP10/1.

Ширина шва вимірювалася на ділянці сталого теплового режиму зварювання за допомогою малого інструментального мікроскопа ММІ-2.

Варто зазначити, що при всіх режимах зварювання тріщини відсутні – як у зоні шва, так і в зоні термічного впливу (ЗТВ).

3.2.1.2 Аналіз зображень макроструктурних рівнів за результатами комп'ютерно-експериментального моделювання

Здійснено аналіз множини зображень залежності зміни морфоструктур від впливу на них теплового потоку через зміну модулюючої частоти.

Методом візуалізації визначається найкраще значення частоти модульованого імпульсно-періодичного лазерного впливу, що відповідає найкращому режиму температури переохолодження [14–17].

Приклади металографічних зображень зварного шва і колошовної зони термічного впливу представлено відповідно:

- макроструктури – на рис. 3.3; 3.4; 3.5, 3.6;
- мікроструктур – на рис. 3.7 (а, б); 3.8 (а, б);
3.9 (а, б); 3.10 (а, б);
3.11 (а, б); 3.12 (а, б) [14–17].

На рис. 3.3 зображено результати експериментального дослідження,

що проводилися під дією безперервного лазерного випромінювання.

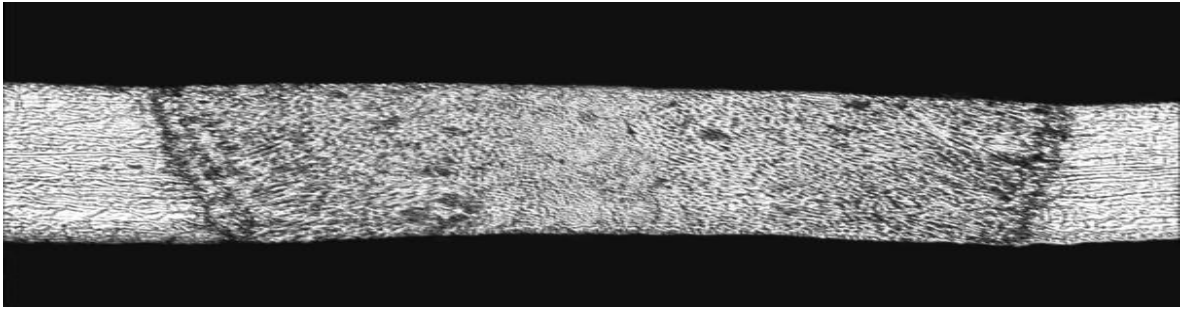


Рис. 3.3. Макроструктура зварного шва, отриманого при безперервному впливі лазерного випромінювання

Аналіз зображення (рис. 3.3) показав неоднорідність структури зварного шва.

Результат дослідження температурного впливу лазерного випромінювання імпульсно-періодичним модульованим сигналом з частотою проходження 100 Гц зображено на рис. 3.4.

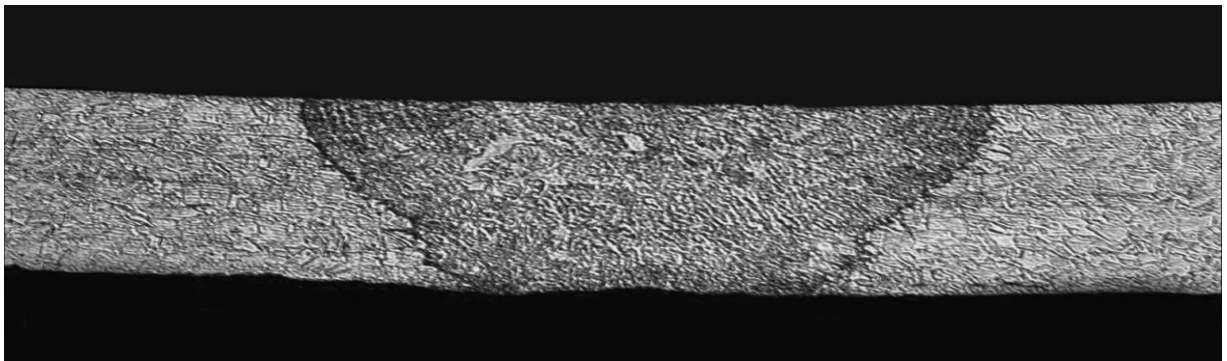


Рис. 3.4. Макроструктура зварного шва, отриманого при частоті модуляції 100 Гц та впливі лазерного випромінювання

Під дією лазерного випромінювання, модульованого з частотою 100 Гц, морфоструктура зварного шва на різних його ділянках (рис. 3.4) має неоднорідну структуру.

На рис. 3.5 зображено результати дослідження морфоструктури зварного шва при температурному впливі лазерного випромінювання, модульованого з частотою 1000 Гц.



Рис. 3.5. Макроструктура шва, отриманого при частоті модуляції 1000 Гц

Дослідження морфоструктури зварного шва (рис. 3.5) показало, що при частоті модуляції 1000 Гц неоднорідність морфоструктури зберігається.

Зображення морфоструктури зварного шва на рис. 3.6 проводилося при частоті модуляції 2000 Гц лазерного випромінювання.

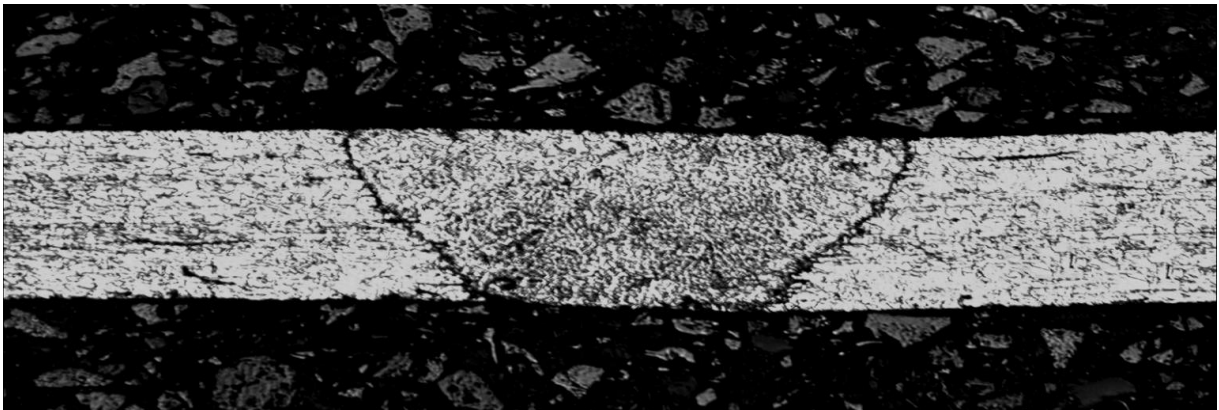


Рис. 3.6. Макроструктура шва, отриманого при частоті модуляції 2000 Гц

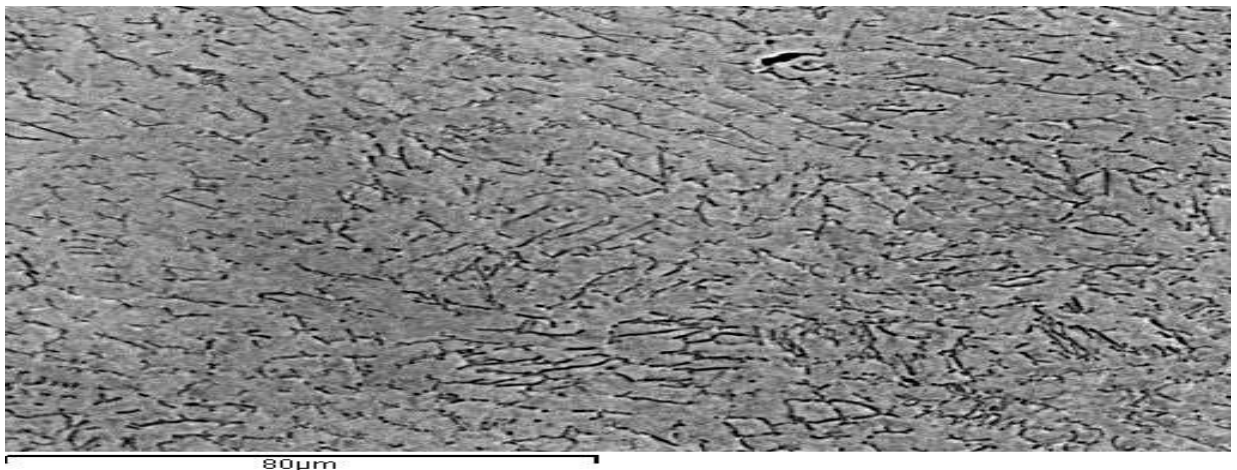
Отже, аналіз показав, що для макроструктур на різних ділянках зварного шва (рис. 3.3; 3.4; 3.5) характерна неоднорідність структур, що призводить до погіршення механічних властивостей зварного з'єднання.

Однак при режимі зварювання з частотою модуляції 2000 Гц (рис. 3.6) формується структурно однорідний шов.

3.2.1.3 Аналіз зображень мікроструктурних рівнів за результатами комп'ютерно-експериментального моделювання

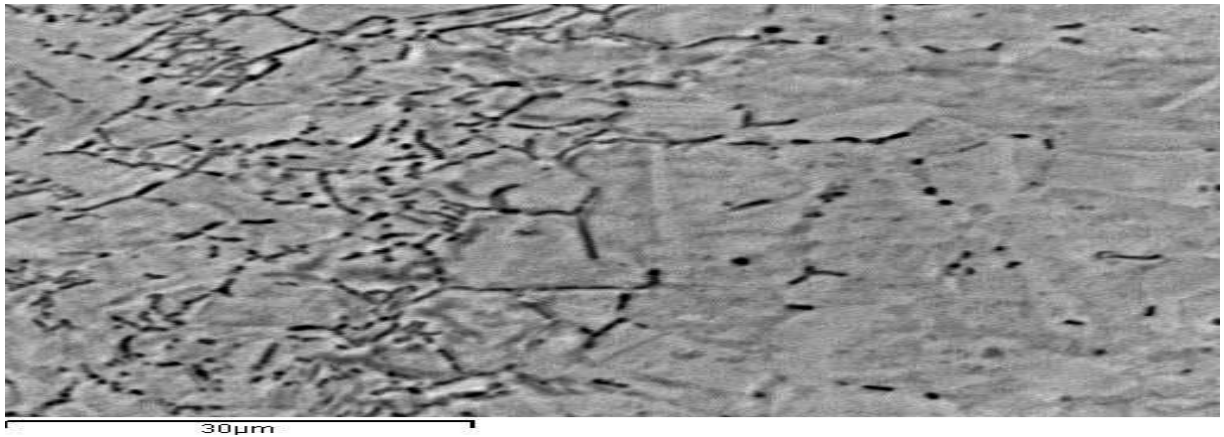
Аналіз результатів експериментального моделювання мікроструктур зварного шва та колошовної зони температурного впливу для зразків з нержавіючої сталі марки 1.4541 товщиною $\delta = 0,2$ мм з різними режимами впливу модульованим лазерним випромінюванням наведено на рис. 3.7 (а, б); 3.8 (а, б); 3.9 (а, б); 3.10 (а, б); 3.11 (а, б); 3.12 (а, б) [14-17].

При впливі безперервного випромінювання в зварному шві формується дендритна мікроструктура (рис. 3.7, а), тобто спостерігається висока швидкість кристалізації при зварюванні лазерним випромінюванням.



а) мікроструктура зварного шва;

Рис. 3.7. Мікроструктура зварного шва та колошовної зони зварного шва при дії безперервним лазерним випромінюванням потужністю 57 Вт



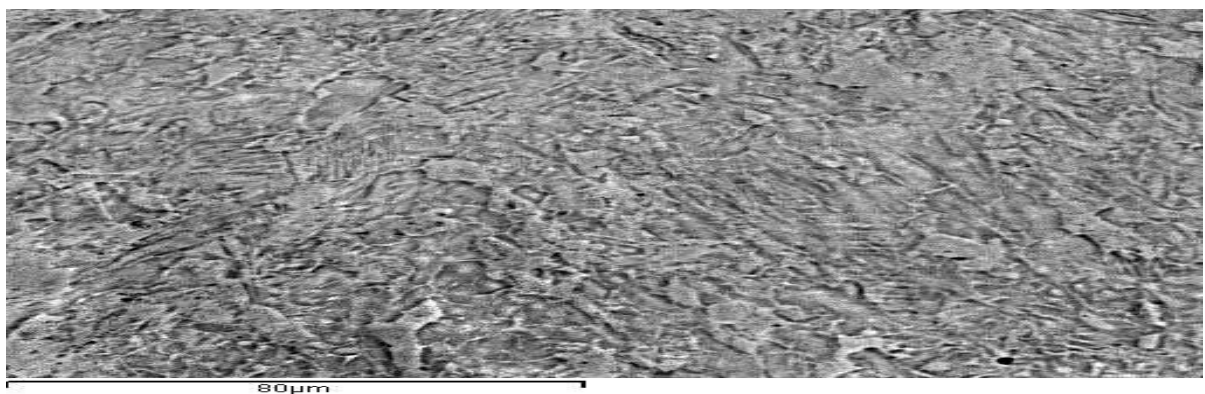
б) мікроструктура колошовної зони зварного шва

Рис. 3.7. Мікроструктура зварного шва та колошовної зони зварного шва при дії безперервним лазерним випромінюванням потужністю 57 Вт

У зоні, що прилягає до лінії сплаву, формуються дуже великі рівноосні зерна розміром до 10 мкм (рис. 3.7, б).

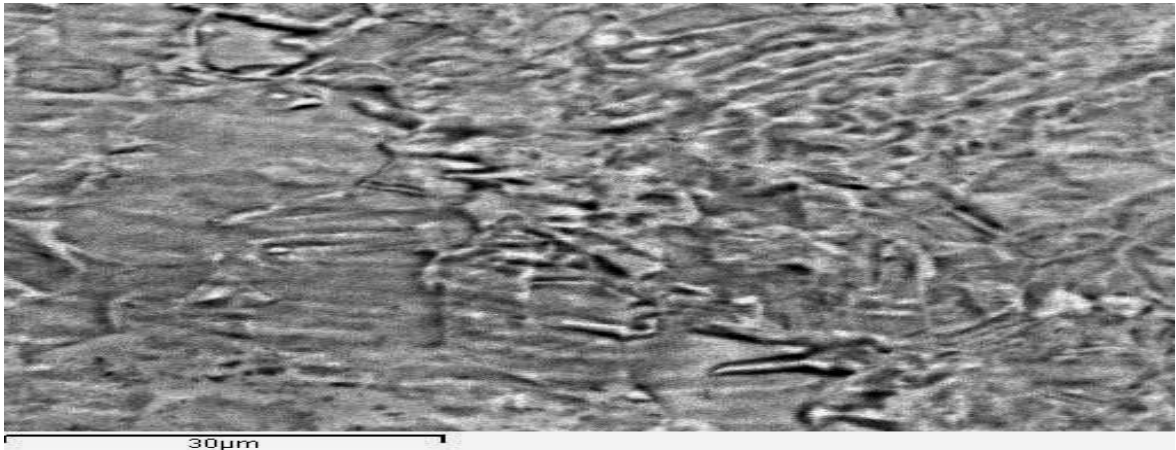
Лазерна обробка нержавіючої сталі модульованим випромінюванням з частотою модуляції 100 Гц показала, що в структурі шва формуються зварювальні лінії, які істотно погіршує його якість (рис. 3.8, а).

За структурою шов є неоднорідним, що, очевидно, є результатом змішаної форми кристалізації, що зумовлює формування великих кристалітів з ділянками відманштетової структури (рис. 3.8, б).



а) мікроструктура зварного шва;

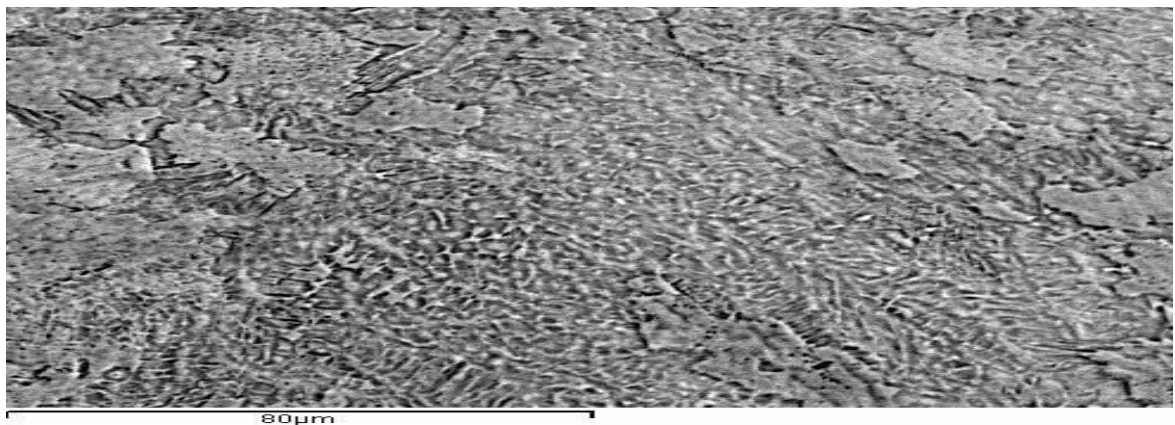
Рис. 3.8. Мікроструктура зварного шва та колошовної зони зварного шва при дії модульованим лазерним випромінюванням з частотою модуляції 100 Гц



б) мікроструктура колошовної зони зварного шва

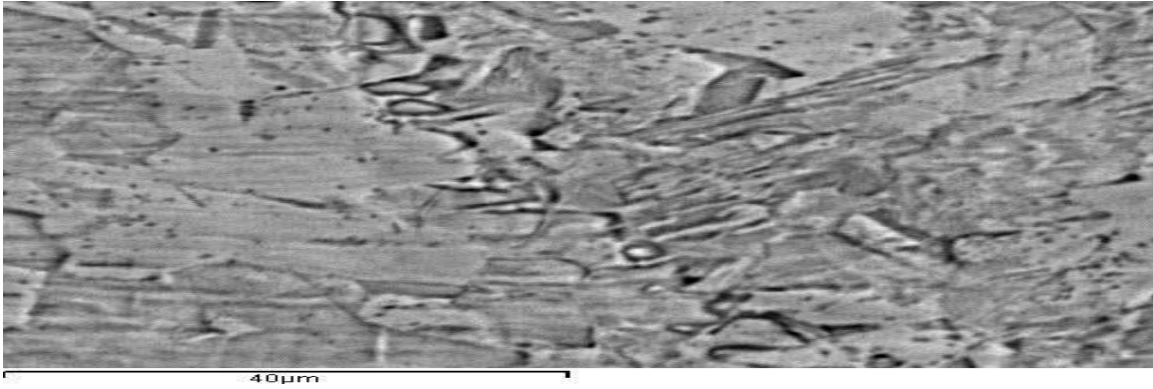
Рис. 3.8. Мікроструктура зварного шва та колошовної зони зварного шва при дії модульованим лазерним випромінюванням з частотою модуляції 100 Гц

При частоті модуляції лазерного випромінювання 1000 Гц однорідність структури не покращилася, проте з'явилися ділянки з пористою формою кристалізації (рис. 3.9, а).



а) мікроструктура зварного шва;

Рис. 3.9. Мікроструктура зварного шва та колошовної зони зварного шва при дії модульованим лазерним випромінюванням з модуляції 1000 Гц



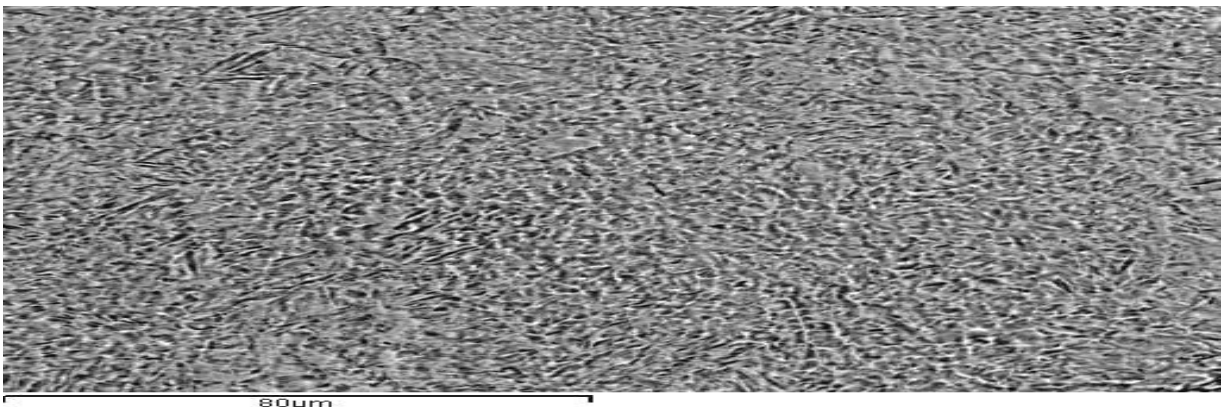
б) мікроструктура колошовної зони зварного шва

Рис. 3.9. Мікроструктура зварного шва та колошовної зони зварного шва при дії модульованим лазерним випромінюванням з модуляції 1000 Гц

Порівняльний аналіз мікроструктур показав, що при частоті модуляції 1000 Гц спостерігається неоднорідність структури, з'явилися ділянки з пористою формою кристалізації.

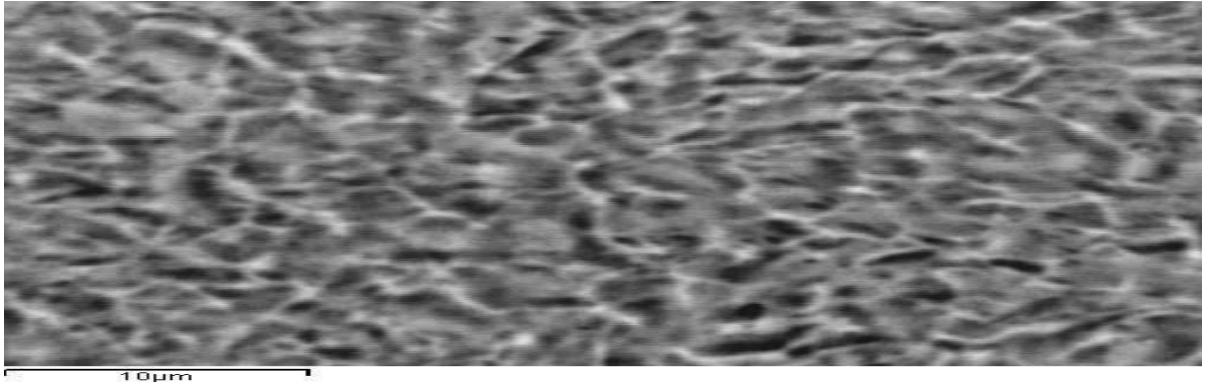
Подальше збільшення частоти модуляції показало покращення мікроструктур, зображених на рис. 3.10 (а, б).

Збільшення частоти модуляції лазерного впливу до 2000 Гц (рис. 3.10, б) забезпечує мікроструктуру переважно з комірчастою формою кристалізації й формуванням дрібних зерен розміром ~ 3 мкм.



а) мікроструктура зварного шва;

Рис. 3.10. Мікроструктура зварного шва та колошовної зони зварного шва при дії модульованим лазерним випромінюванням з частотою модуляції 2000 Гц

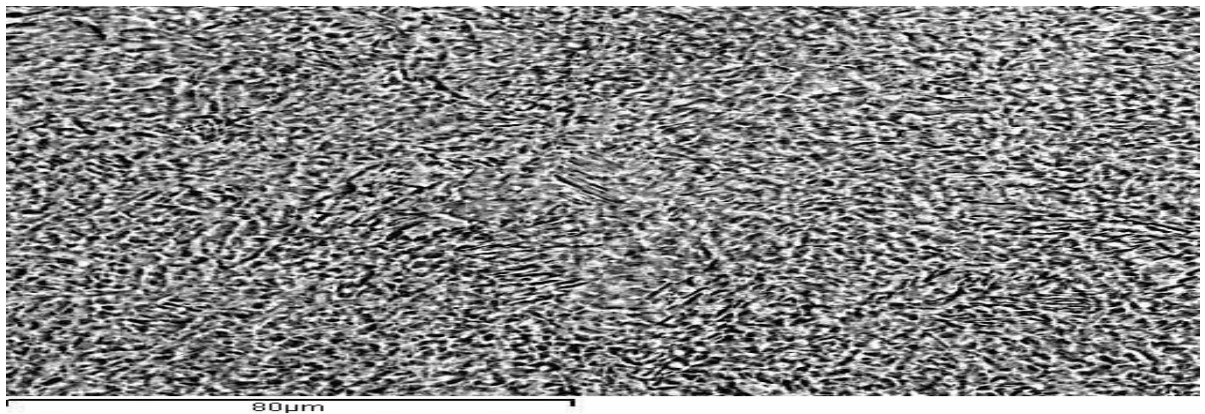


б) мікроструктура колошовної зони зварного шва

Рис. 3.10. Мікроструктура зварного шва та колошовної зони зварного шва при дії модульованим лазерним випромінюванням з частотою модуляції 2000 Гц

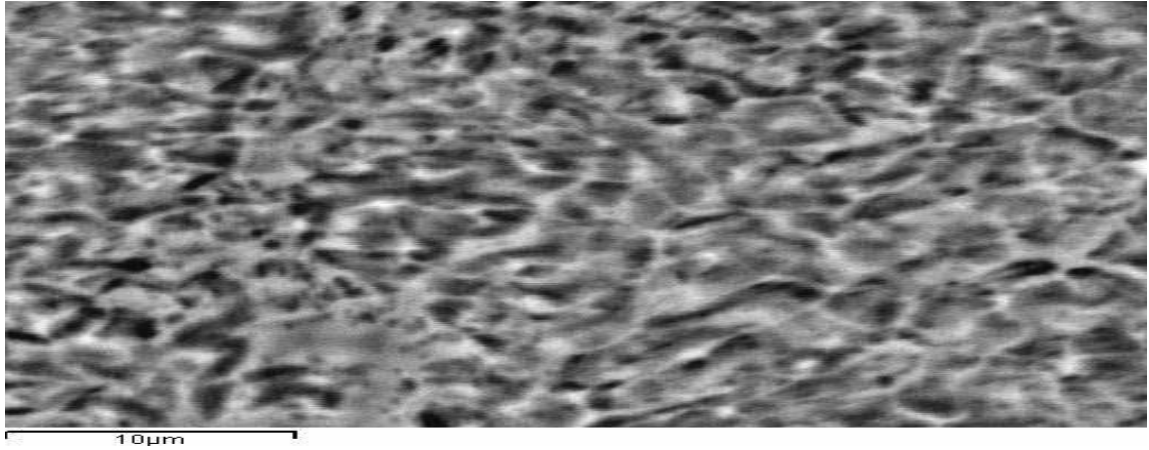
Отже, при режимі зварювання з частотою модуляції 2000 Гц формуються структурно однорідний шов та колошовна зона, що зображено на рис. 3.10 (а, б).

Аналогічно однорідна мікроструктура (рис. 3.11, а, б) спостерігалася при частоті модуляції 3000 Гц.



а) мікроструктура зварного шва;

Рис. 3.11. Мікроструктура зварного шва та колошовної зони зварного шва при дії модульованим лазерним випромінюванням з частотою модуляції 3000 Гц



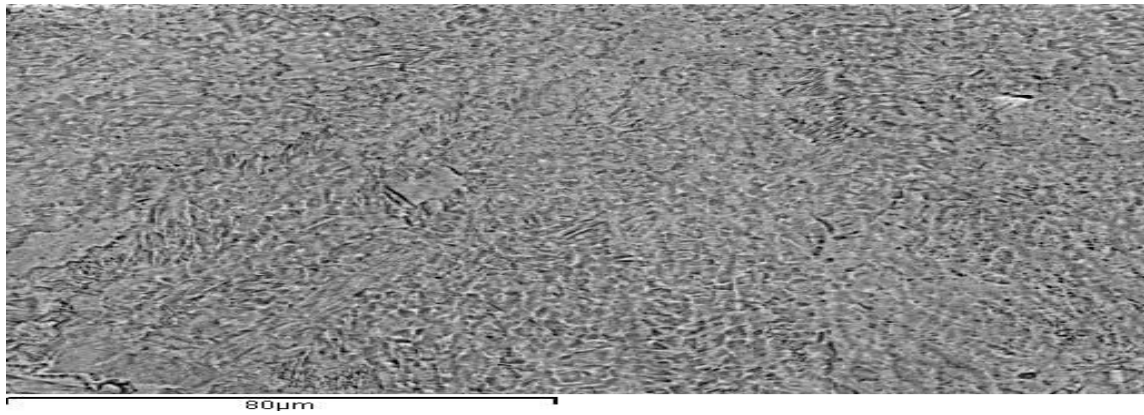
б) мікроструктура колошовної зони зварного шва

Рис. 3.11. Мікроструктура зварного шва та колошовної зони зварного шва при дії модульованим лазерним випромінюванням з частотою модуляції 3000 Гц

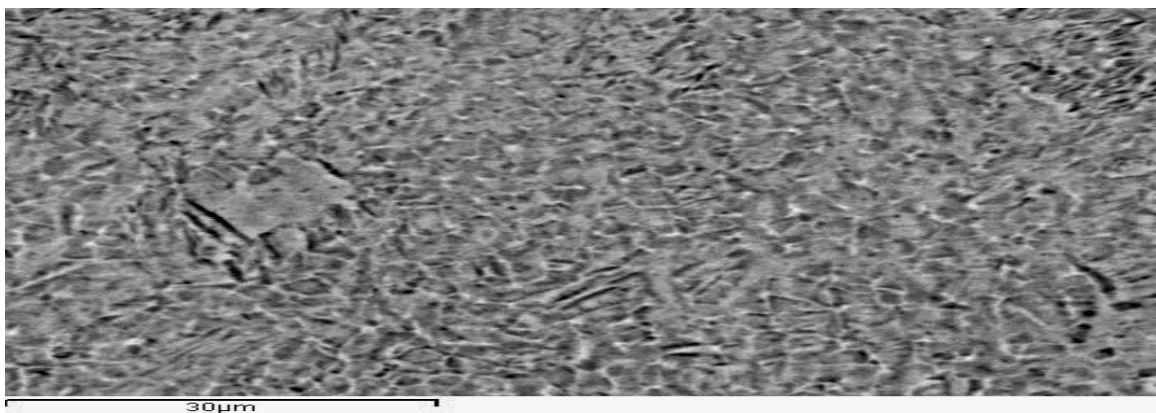
Варто зазначити, що в цих випадках лінія сплаву стає тоншою, а зерно дрібнішим (рис. 3.10, б та рис. 3.11, б), що позитивно впливає на механічні властивості колошовної зони.

Дослідження впливу модульованим лазерним випромінюванням з частотами 5000 і 10 000 Гц на морфоструктури, що зображено на рис. 3.12 (а, б) та на рис. 3.13 (а, б), показало погіршення мікроструктур, які наведені нижче.

Аналіз мікроструктури зварного шва при впливі модульованим лазерним випромінюванням з частотою модуляції 5000 Гц показав погіршення однорідності формування структури зварного шва та її огрубіння.



а)



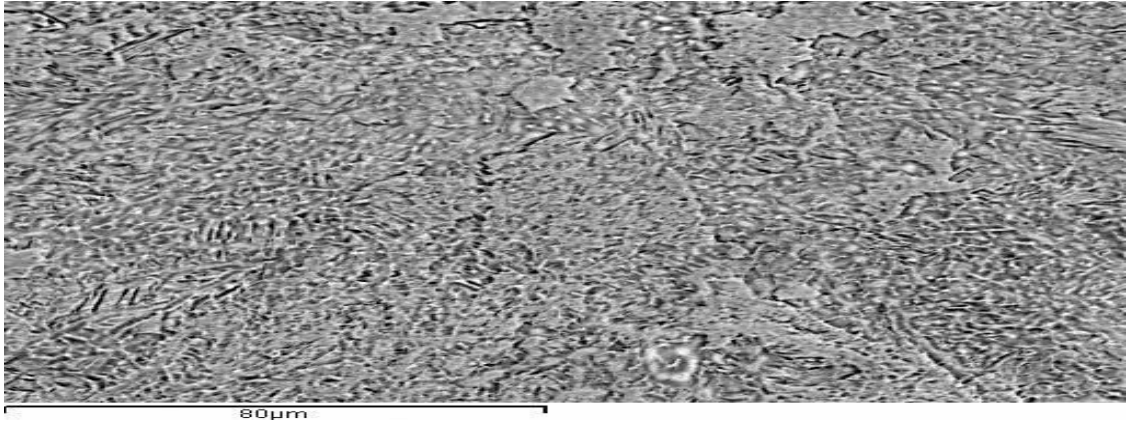
б)

а) мікроструктура зварного шва;

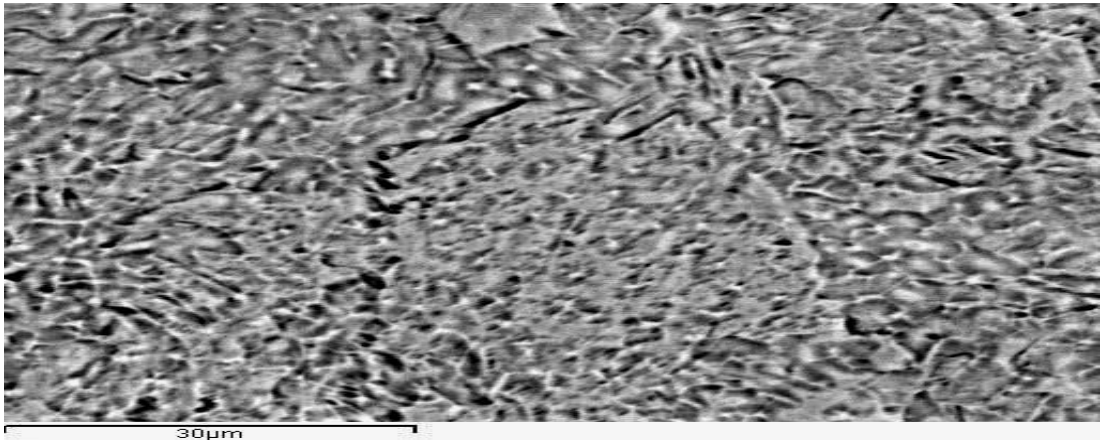
б) мікроструктура колошовної зони зварного шва

Рис. 3.12. Мікроструктура зварного шва та колошовної зони зварного шва при дії модульованим лазерним випромінюванням з частотою модуляції 5000 Гц

Результати дослідження наведеної мікроструктури колошовної зони зварного шва при впливі модульованим лазерним випромінюванням з частотою модуляції 5000 Гц підтвердили погіршення її однорідності.



а)



б)

а) мікроструктура зварного шва;

б) мікроструктура колошовної зони зварного шва

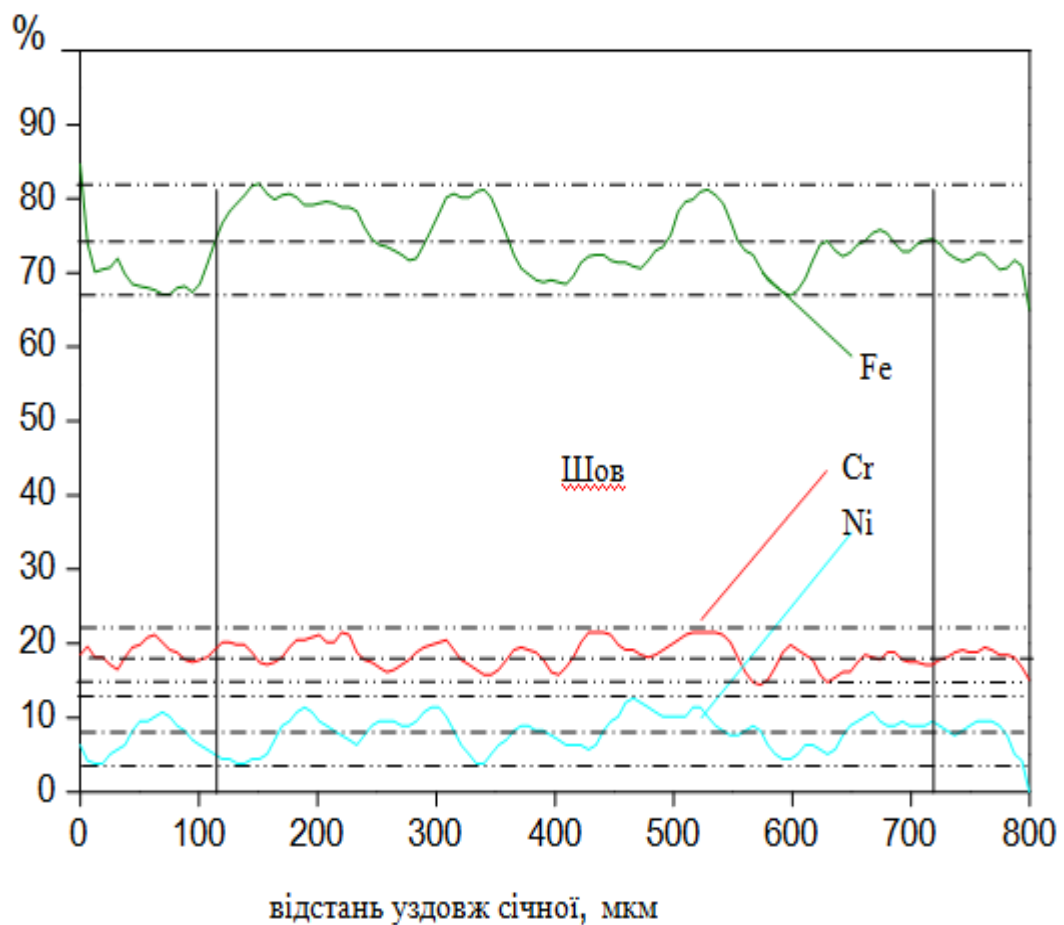
Рис. 3.13. Мікроструктура зварного шва та колошовної зони зварного шва при дії модульованим лазерним випромінюванням з частотою модуляції 10 000 Гц

Отже, аналіз мікроструктур рис. 3.12 (а, б) і рис. 3.13 (а, б) показав, що підвищення частоти проходження імпульсів (5000 Гц і 10 000 Гц) призвело до погіршення однорідності формування мікроструктур.

Крім того, за результатами експерименту визначено інформацію, яка характеризує розподілення основних компонентів у зварному шві при різних значеннях частот модуляції лазерного випромінювання, що наведено нижче.

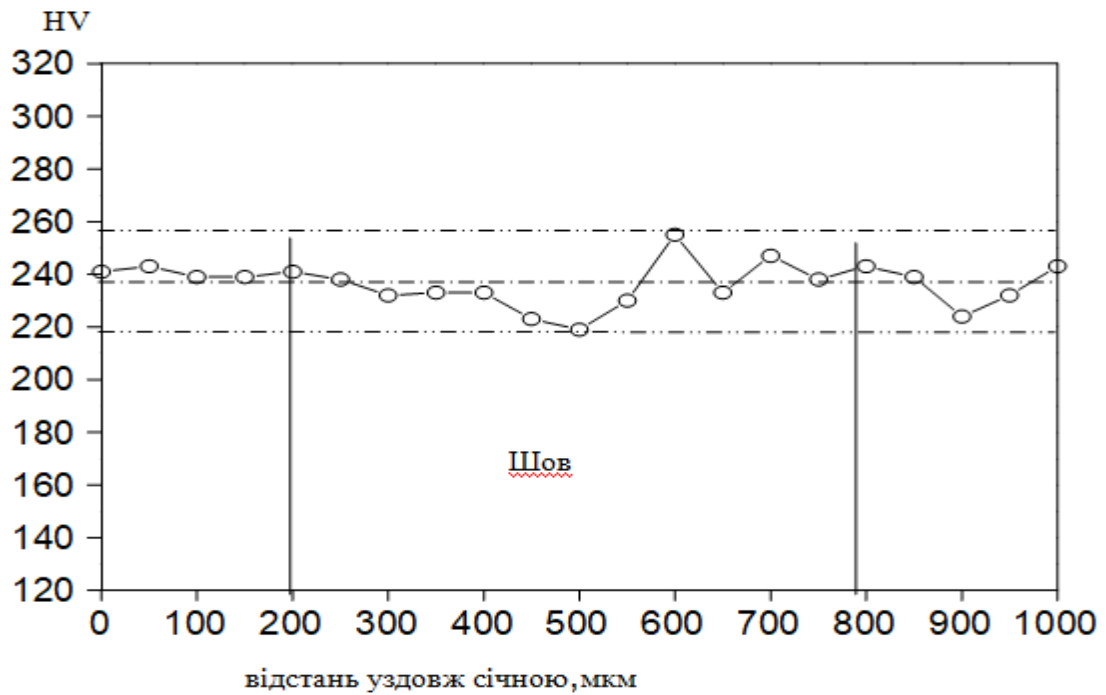
3.2.3 Аналіз зображень розподілення основних компонентів та мікротвердості за результатами комп'ютерно-експериментального моделювання

Результати експериментального дослідження розподілень основних компонентів (Fe, Cr, Ni) у структурах зварних швів та розподілень мікротвердості в зоні зварного з'єднання наведено на рис. 3.14 (а, б); 3.15 (а, б); 3.16 (а, б); 3.17 (а, б) [14–17].



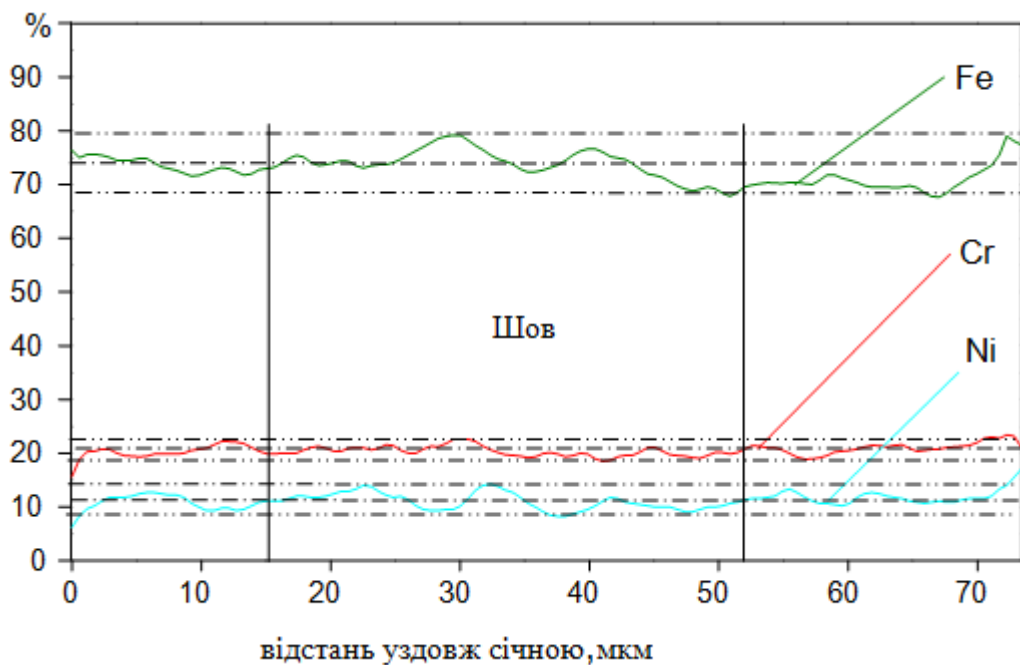
а)

Рис. 3.14. Розподілення основних компонентів (Fe, Cr, Ni) у структурі зварного шва при впливі безперервним випромінюванням лазера



б)

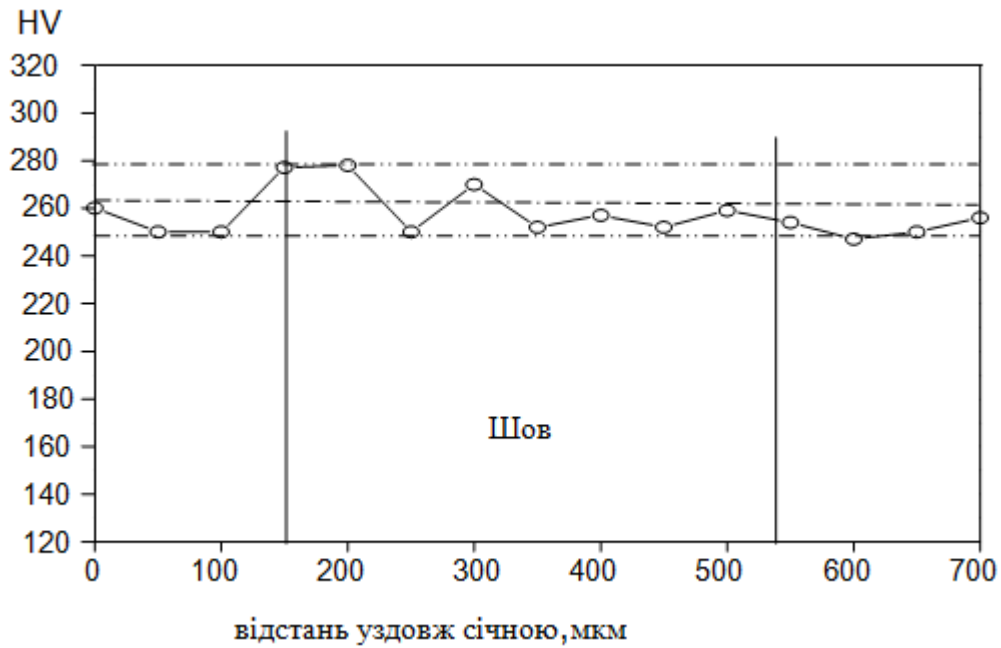
Рис. 3.14. Розподілення мікротвердості у структурі зварного шва при впливі безперервним випромінюванням лазера



а)

Рис. 3.15. Розподілення основних компонентів (Fe, Cr, Ni) у структурі зварного шва при впливі випромінюванням лазера з частотою модуляції

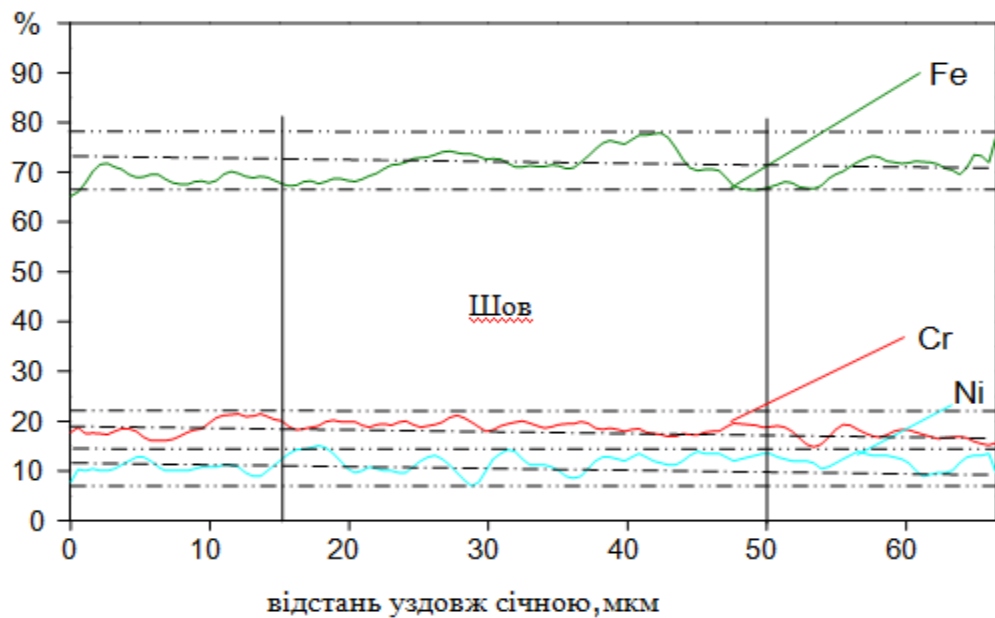
100 Гц



б)

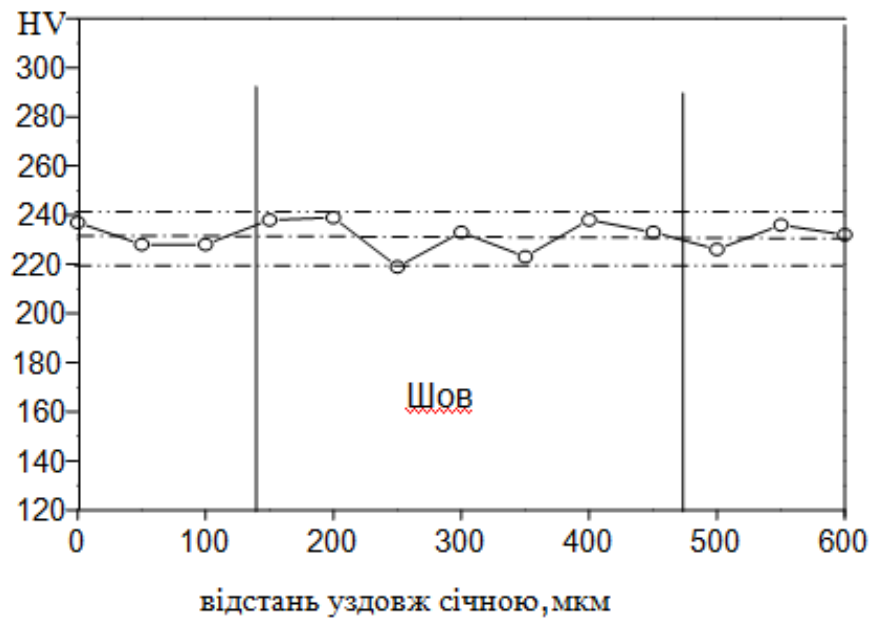
Рис. 3.15. Розподілення мікротвердості у структурі зварного шва при впливі випромінюванням лазера з частотою модуляції 100 Гц

Через неоднорідність мікротвердість різних ділянок відрізняється, що призводить до погіршення механічних властивостей зварного з'єднання.



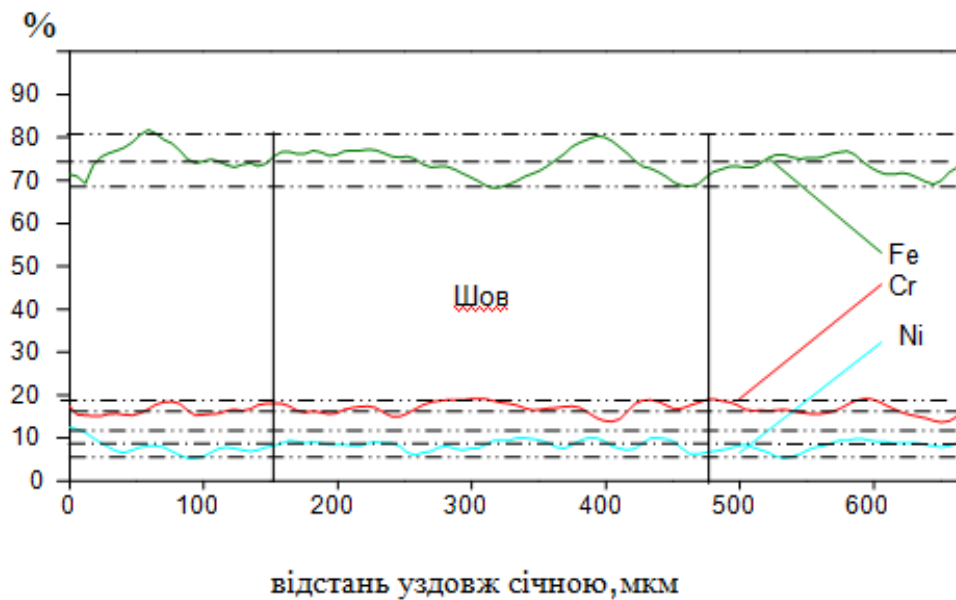
а)

Рис. 3.16. Розподілення основних компонентів (Fe, Cr, Ni) у структурі зварного шва при впливі випромінюванням лазера з частотою 1000 Гц



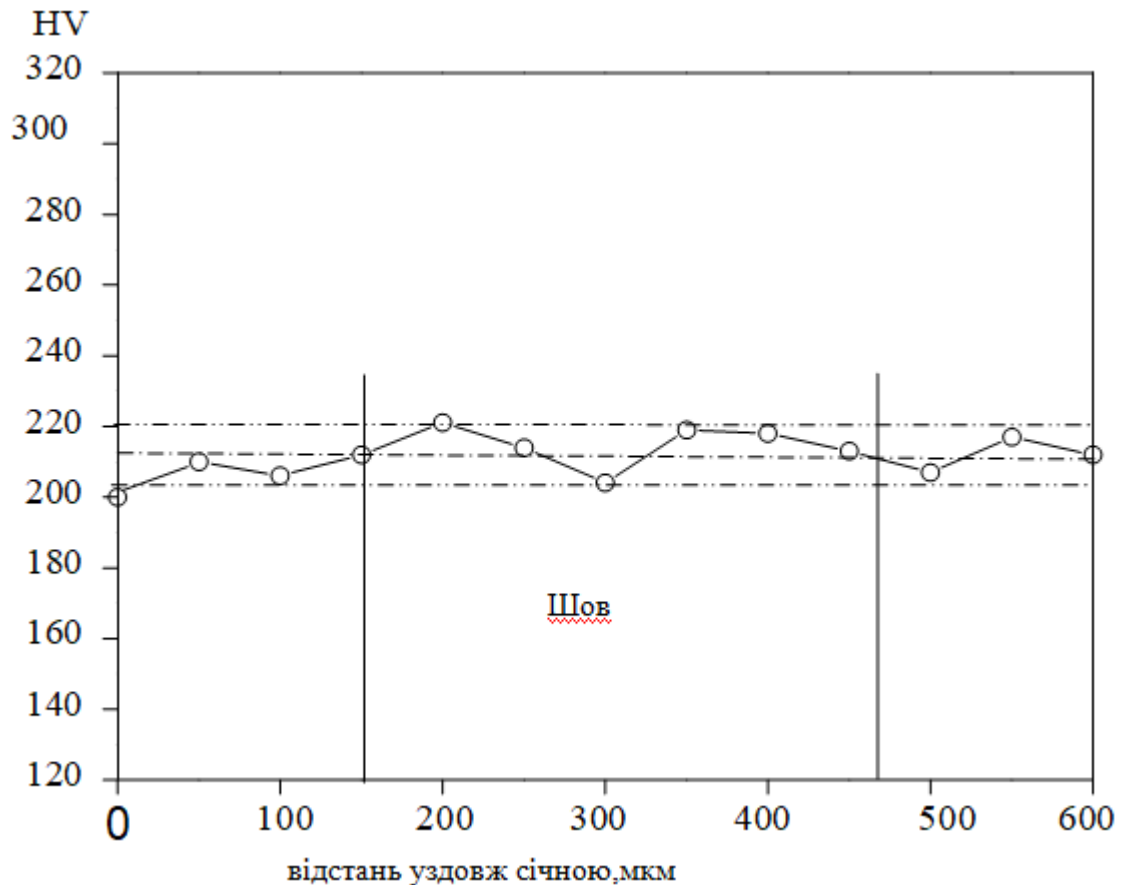
б)

Рис. 3.16. Розподілення мікротвердості у структурі зварного шва при впливі випромінюванням лазера з частотою модуляції 1000 Гц



а)

Рис. 3.17. Розподілення основних компонентів (Fe, Cr, Ni) у структурі зварного шва при впливі випромінюванням лазера з частотою модуляції 2000 Гц



б)

Рис. 3.17. Розподілення мікротвердості у структурі зварного шва при впливі випромінюванням лазера з частотою модуляції 2000 Гц

Дослідження розподілень основних компонентів (Fe, Cr, Ni) і мікротвердості у структурах зварних швів при дії випромінюванням лазера з різними частотами модуляції, які наведено на рис. 3.14 (а, б); 3.15 (а, б); 3.16 (а, б); 3.17 (а, б), показало, що хімічний склад зварного шва за основними елементами залишається на рівні основного металу.

Крім того, при всіх режимах лазерного зварювання тріщини відсутні як у зоні зварного шва, так і в зоні температурного впливу.

Результати дослідження підтвердили можливість управління макро-, мікроструктурою зварного з'єднання тонкостінних конструкцій за рахунок використання відповідної модулюючої частоти лазерного випромінювання.

Отже, запропоноване комп'ютерно-експериментальне моделювання дає можливість розширити 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 та додатково шляхом зміни їх частоти проходження.

3.2.4 Другий метод управління кристалізацією литого металу та відображення макро-, мікроструктур зварного шва колошовної зони

Відмітна особливість другого методу управління кристалізацією (порівняно з першим методом) полягає у тому, що при збереженні переваги першого методу другий метод нижче представляє суперпозицію сигналів, яка зображена на рис. 3.18 [15, 16, 18, 19].

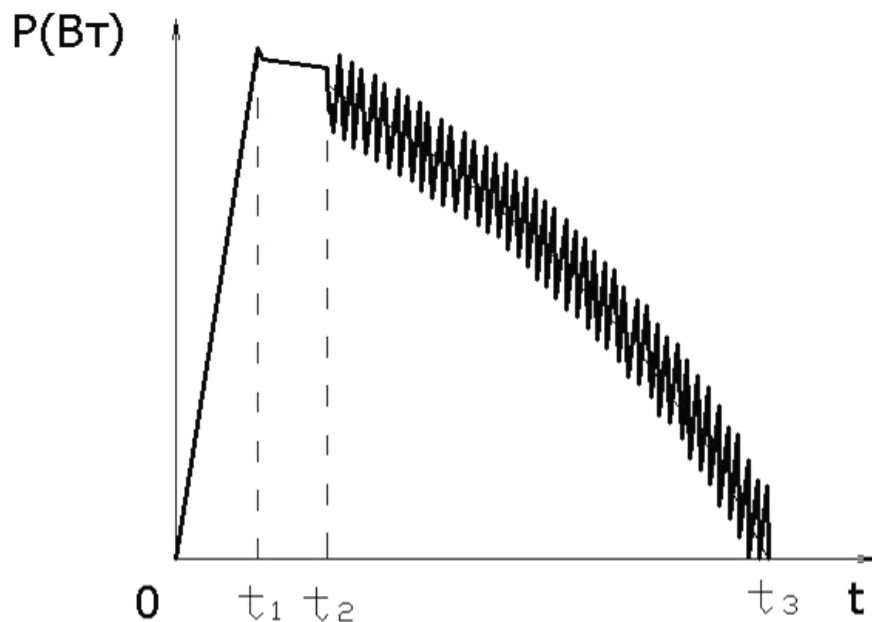


Рис. 3.18. Удосконалена форма модулюючого імпульсу лазерного випромінювання

Причому амплітуда сигналу ультразвукового діапазону забезпечує потрібний нахил ділянки коливання зварювальної ванни. Ця сукупність створює умови зародження максимальної кількості центрів кристалізації та мінімізації лінійної швидкості росту кристалів для зварюваного металу.

Однак недоліком цього методу є низька ефективність введення ультразвукових коливань за рахунок того, що для забезпечення потрібного нахилу нижньої ділянки необхідно обмежувати амплітуду ультразвукових коливань, що суттєво зменшує ефект впливу їх на розплав.

3.2.5 Третій метод управління кристалізацією литого металу та відображення макро-, мікроструктур зварного шва, колошовної зони

Третій *вдосконалений* метод [15, 16] вирішує задачу підвищення ефективності введення ультразвукових коливань у розплав зварювальної ванни за рахунок збільшення амплітуди імпульсів ультразвукової частоти, що сприяє підвищенню пластичності та міцності зварного з'єднання.

Підвищення ефективності лазерного зварювання здійснюється шляхом використання комплексного лазерно-ультразвукового впливу на зварювальну ванну.

Сутність методу лазерного зварювання полягає в тому, що локально плавлять метал у зоні зварювання імпульсами складної форми сфокусованого лазерного випромінювання. Водночас імпульси зі складною конфігурацією формуються методом широтно-імпульсної модуляції лазерного випромінювання і рухаються з частотою ультразвукового діапазону і максимально допустимою амплітудою. Це забезпечує рівноважну дрібнозернисту мікроструктуру зварного шва.

Проведено верифікацію запропонованого методу лазерного зварювання з широтно-імпульсною модуляцією випромінювання, результат якої зображено на рис. 3.19, де для порівняльного аналізу показано

мікроструктуру шва, виконаного неперервним (а) та імпульсним (б) випромінюванням (несуча частота – 150 кГц) при зварюванні сталі типу 08X18H10T потужністю близько 60 Вт.

Це дало змогу провести візуально порівняльний аналіз і підтвердити переваги запропонованого методу наявністю більш дрібнозернистої мікроструктури металу зварного шва [15].

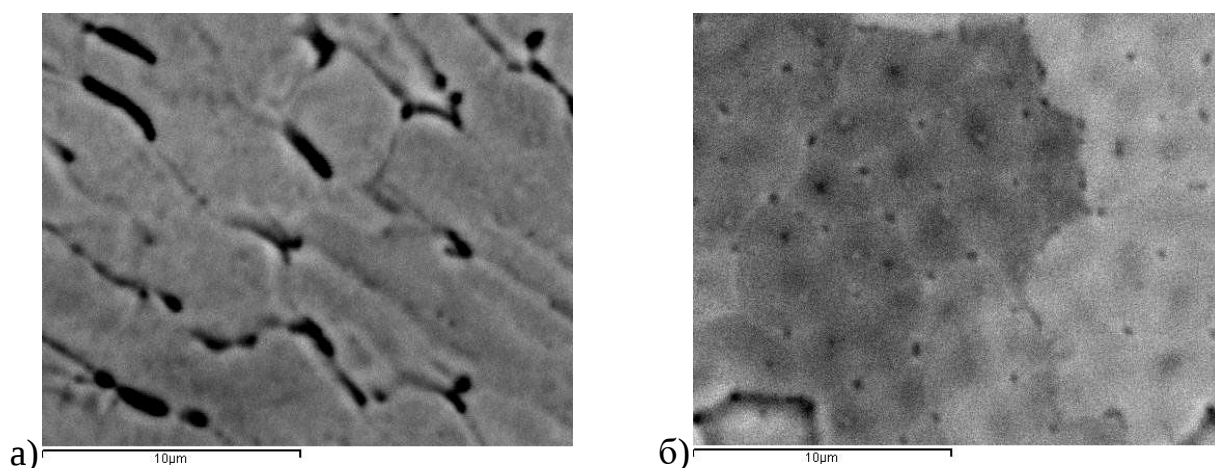


Рис. 3.19. Мікроструктури зварного шва, виконаного неперервним (а) та імпульсним з широтно-імпульсною модуляцією (б) лазерним випромінюванням

Аналіз цих прикладів мікроструктур зварного шва підтвердив, що широтно-імпульсна модуляція випромінювання дає змогу отримувати значно більш дрібнозернисту структуру металу зварного шва.

Отже, візуалізація зображень макро-, мікроструктур та розподілень основних хімічних елементів і мікротвердості у зварному з'єднанні тонкостінних конструкцій сприяє швидкому освоєнню відповідної інформації та створенню бази знань в умовах спеціалізованого підприємства, що забезпечує підвищення ефективності інформаційної технології прийняття рішень для управління лазерним зварюванням тонкостінних конструкцій.

Висновки до розділу 3

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 та додатково шляхом частотного, амплітудного, широтно-імпульсного впливу комбінованого лазерно-ультразвукового випромінювання за допомогою запропонованих трьох методів створення умов зародження максимальної кількості центрів кристалізації при мінімізації лінійної швидкості росту кристалів для металу, що зварюється.

Першим методом управління кристалізацією є створення умов зародження максимальної кількості центрів кристалізації при мінімізації лінійної швидкості росту кристалів для металу, що зварюється 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 (≤ 3 мкм) аустенітного зерна.

Другим удосконаленим методом є формування умов зародження максимальної кількості центрів кристалізації та мінімізації лінійної швидкості росту кристалів для металу, що зварюють шляхом модулювання частотою ультразвукового діапазону, що забезпечує потрібний нахил нижньої ділянки і коливання зварювальної ванни. Однак цей метод має низьку ефективність через обмеження амплітуди ультразвукових коливань.

Третім методом підвищення ефективності лазерного зварювання з широтно-імпульсною модуляцією випромінювання вирішується за рахунок локального плавлення в зоні зварювання імпульсами сфокусованого лазерного випромінювання, водночас для ефективного комплексного лазерно-ультразвукового впливу на зварювальну ванну шва методом широтно-імпульсної модуляції лазерного випромінювання формують імпульси, які мають максимально допустиму амплітуду, що забезпечує рівноважну дрібнозернисту мікроструктуру. Це забезпечує підвищення пластичності та міцності зварного з'єднання.

Отже, запропоновано спеціалізована інформаційна модель знань на основі реляційних відношень металографічних зображень, розподілень основних компонентів (Fe, Cr, Ni) і мікротвердості у структурах зварних швів при дії випромінюванням лазера з різними частотами модуляції. Їх візуалізація підвищує процес прийому інформації на 3, ..., 4 порядки.

Список використаних джерел

- [1] Морозов В.П. Влияние колебательного механизма кристаллизации на процесс измельчения первичной структуры металла шва и зоны термического влияния. «Наука и образование», 2010, Электронный журнал, № 9, с. 1 – 18.
- [2] Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением. Под. ред. акад. Б.Е. Патона. М., «Машиностроение», 1974 – 768 с.
- [3] Левин Ю.Ю., Ерофеев В.А. Судник В.А. Физико – технологические условия получения бездефектных соединений при импульсной лазерной сварке//Сварочное производство. – 2008. – №4 – С. 20 –24.
- [4] Пат. РФ №2120364, МКИ В23К26/00; Каюков С.В., Гусев А.А., Самарцев Г.В., Канавин А.П. Способ импульсной лазерной сварки и установка для его осуществления. Заявл.27.09.96; Оpubл.20.10.98, Бюл. №28 2002. – 2с.
- [5] Пат. РФ №2186667, МКИ В23К26/20; Басиев Т.Т., Федин А.В., Чащин Е.А., Шилов И.В. Способ лазерной сварки металлов и сплавов. Заявл.10.01.00; Оpubл.10.08.02.
- [6] Пат. РФ №2269401. МКИ В23К26/20; Мышковец В.Н., Максименко А.В., Шалупаев С. В., Тучин А. Н., Юркевич С. Н. Способ лазерной сварки металлов. Заявл. 27.08.04; Оpubл.10.02.06.
- [7] J. Bruncko/ Laserove mikrozvaranie kovovych materialov// Zvaranie – svarovani. – 2010. – №9 –10 – С. 219 –222.
- [8] Celen S., Karadeniz S., Ozden H. Effect of laser welding parameters on fusion zone morphological, mechanical and microstructural characteristics of AISI 304 stainless steel// Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. – 2008. – Vol. 39, № 11. – P. 845 –850.
- [9] Григорьянц А.Г. Технологические процессы лазерной обработки : [учеб. пособие для вузов] / А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.И. Мисюров;

под ред. А.Г. Григорьянца. – М.: Изд –во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 664с.

[10] Назарчук А.Т., Снисарь В.В., Демченко Э.Л. Получение равнопрочных сварных соединений закаливающихся сталей без подогрева и термической обработки //Автоматическая сварка, 2005, №5. с.41 –46.

[11] Раямяки П., В.А. Кархин, П.Н. Хомич. Определение основных характеристик температурного поля для оценки типа затвердевания металла шва при сварке плавлением. //Сварочное производство.2007. №2. С. 3 –7.

[12] Силлен Р. Введение в термический анализ металлов. // ИТБ "Литьё Украины" №5(57), 2005. – С.6 –8.

[13] Теория сварочных процессов: Учеб. Для вузов по спец. «Оборуд. и технология сварочн. пр –ва»/В.Н. Волченко, В.М. Ямпольский и др.; под ред. В.В. Фролова. – М.: Высш.шк., 1988. 559 с.

[14] А. Г. Лукашенко, Т. В. Мельниченко, та Д. А. Лукашенко, “ Лазерная сварка тонколистовой нержавеющей стали модулированным излучением”, Автоматическая сварка, № 4, с. 19-23, 2012.

[15] 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) В 23К 26/21. Пат. на винахід 109328 С2 Україна, № а 2013 14855, заявл. Груд. 18, 2013, опубл. Сер. 10, 2015, Бюл. № 1

[16] 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) В23К 26/00. Пат. на винахід 68159 Україна, № а 2011 13985, заявл. Лис. 28, 2011, опубл. Бер. 12, 2012, Бюл. № 5

[17] А. 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.

- [18] Получение импульсов лазерного излучения с изменяющейся во времени интенсивностью / Компания ООО «СТК-ВИКОМ» // Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.ipower.ru/article/article3/index.html>
- [19] Д.М. Гуреев. Влияние ультразвука на изменение структурно-напряженного состояния в ваннах лазерного расплава, Квантовая электроника, 24, №4, 1997, с.338-340.
- [20] Д. А. Лукашенко, В. Д. Шелягин, А. Г. Лукашенко, А. В. Бернацкий, В. П. Гаращук и В. И. Луценко, "Лазерная сварка тонколистовой нержавеющей стали", *Автоматическая сварка*, № 4, с. 45-49, 2011.
- [21] Галуза А. А., Коленов И. В., Беляева А. И. Программно-аппаратная платформа для разработки систем автоматизации лабораторного эксперимента // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2013. Т. 5. № 9 (65). С. 11–16. Режим доступа : <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/18446/16193>

РОЗДІЛ 4

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ОБ'ЄКТИВНОГО ОЦІНЮВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ КОМПОНЕНТІВ ДЛЯ АНАЛІЗУ ТА СИНТЕЗУ

У четвертому розділі отримала подальший розвиток інформаційна технологія об'єктивного оцінювання багатопараметричних компонентів апаратного забезпечення збору даних (КАЗЗД) і управління шляхом:

- запропонованих основних операцій інформаційної технології об'єктивного оцінювання багатопараметричних компонентів для аналізу та синтезу;
- системного аналізу датчиків положення стику з'єднаних тонкостінних конструкцій та визначення кращого типу;
- дослідження існуючих компонентів апаратного забезпечення інформаційної системи збору даних і управління та визначення кращих для створення спеціалізованої інформаційної бази даних;
- верифікації отриманих результатів через розрахунки синтезованих критеріїв видачі релевантної інформації на прикладах лазерних випромінювачів, волоконних лазерних модулів та скануючих елементів датчиків положення зварного стику тонкостінних конструкцій.

4.1 Основні операції інформаційної технології об'єктивного оцінювання багатопараметричних компонентів

Шляхом аналізу інформаційних систем встановлено, що підвищення техніко-економічних показників компонентів апаратного забезпечення збору даних і управління призводить до адекватного підвищення ефективності системи в цілому [16, 17, 25]. Тому, при створенні нової або розширенні спеціалізованої бази даних через вибір із множини існуючих серійно випускових інтегрованих компонентів кращих за багатьма параметрами, або визначення напрямку вдосконалення є однією з першочергових завдань [1, 6-12, 19].

При цьому для порівняного оцінювання компонентів необхідно визначити показник, що забезпечує об'єктивне значення за багатьма параметрами, тобто створити інформаційну технологію об'єктивного оцінювання, яка базується на використанні наступних операцій:

- створення реляційної моделі структурованих техніко-економічних показників для множини компонентів, що досліджуються;
- формування інформаційної моделі узагальненого вигляду для визначеної множини компонентів;
- розробка критеріїв виводу релевантної інформації (КВРІ) для кількісного об'єктивного оцінювання багатопараметричних компонентів з призначенням фізичного тлумачення;
- візуалізація результатів розрахунків через побудову гістограм КВРІ для множини компонентів, що аналізуються;
- аналіз результатів розрахунків КВРІ та визначення кращих компонентів через візуалізацію побудованих гістограм із множини компонентів, що досліджуються;
- аналіз взаємозв'язків між значеннями відповідними критеріями виводу релевантної інформації компонента через побудову в одному

квадранті з координатами визначених критеріїв виводу релевантної інформації;

- виявлення компонентів з високим енергетичним критеріїв виводу релевантної інформації та визначення напрямку його вдосконалення;
- синтезування результатів узагальнених критеріїв виводу релевантної інформації визначених компонентів для об'єктивного оцінювання інформаційної системи в цілому [2-5, 13, 14, 19].

4.2 Системний аналіз датчиків положення стику з'єднаних тонкостінних конструкцій

Для одержання якісного з'єднання деталей обов'язкове співпадання траєкторії руху зварювального інструменту з лінією стику [26-30].

В системах стеження за цим співпаданням використовують, у тому числі, датчики положення стику з'єднаних тонкостінних конструкцій [24, 31-33].

При цьому вибір кращих за характеристиками датчиків сприяє значному покращенню якості інформаційної системи в цілому.

По принципу дії датчики класифікуються на:

- копірні (контактні);
- фотоелектричні;
- телевізійні;
- електромагнітні;
- дугові;
- теплові;
- пневматичні;
- ультразвукові;
- зондуючі лазерні датчики;
- лазерні оптико-акустичні дефектоскопи;

- датчики відбитого від поверхні зварювальної ванни лазерного проміння;
- відеосенсорні пристрої лінійного (одномірного) та матричного (двомірного) типу;
- датчики пароплазмового факелу та інші.

До недоліків контактних датчиків відносять низьку надійність і точність, можливість механічних пошкоджень, обмеження при застосуванні їх у важкодоступних місцях.

Із групи безконтактних слідкуючих датчиків, робота яких заснована на оптичних принципах, в якості елементів оптичних датчиків використовують напівпровідникові пристрої.

Основні особливості датчиків положення стику деталей, що використовуються в лазерних технологічних комплексах більш детально приведені в табл. 4.1 [24, 35].

Системний аналіз існуючих датчиків показав, що при зварюванні за допомогою лазерного променя до найбільш розповсюджених та ефективних слід віднести:

- датчики відбитого від поверхні зварювальної ванни лазерного проміння;
- зондуючий лазерний датчик;
- лазерний оптико-акустичний дефектоскоп.

Широкого застосування набули датчики на основі ПЗС – матриць, або ПЗС – лінійок тому, що вони забезпечують:

- безінерційність;
- відсутність викривлень геометричної форми об'єкта,
- високу механічну міцність,
- стійкість до вібрації,
- низьку напругу живлення й енергію споживання,
- компактність,
- малу масу та габарити [31, 34, 36].

Таблиця 4.1

Основні особливості датчиків положення стику деталей в лазерних технологічних комплексах

Тип датчика	Принцип дії й метод вимірювання відхилення стику від заданої траєкторії	Перевага	Недолік
Фотоелектричні датчики (ФД)	ФД контролює положення допоміжної лінії, яка наноситься паралельно стику, на відстані від нього та виноситься в сторону від зварювальної головки.	Простота конструкції	Низька точність та перешкодостійкість при роботі в умовах сильного світлового випромінювання зони зварювання.
Скануючий по колу ФД у слідкуючих системах	Центр кола сканування суміщається з центром дії джерела зварювального тепла, при лазерному – оптичної осі сфокусованого пучка. ФД пересікає по черзі то стик, то зварювальний шов й навпаки, дозволяє обрахувати інтервали часу між пересіченням стику і кромки шва.	Однозначно характеризується положення центра теплової дії відносно стику.	Низька надійність і перешкодостійкість. Необхідність контрольних ліній для підвищення контрасту. ФД визначає миттєве положення зони зварювання.

Основні особливості датчиків положення стику деталей в лазерних технологічних комплексах

Тип датчика	Принцип дії й метод вимірювання відхилення стику від заданої траєкторії	Перевага	Недолік
Електричний датчик зображення зварювальної ванни (ЕДЗВ).	ЕДЗВ розміщений безпосередньо за головою зварювального робота і захищений від прямого випромінювання дуги. Плоский лазерний пучок направляєтся двома дзеркалами поперек напрямку ходу зварювальної головки під кутом $50^{\circ} \dots 80^{\circ}$ до поверхні металу. Побудова зображень здійснюється камерою із зарядовим зв'язком.	Система збору даних і управління процесом достатньо точна.	Занадто складна апаратурна реалізація (лінзи, оптичний фільтр, комп'ютерний блок збору і обробки даних та інші). Велика вага та габарити, низька надійність вимірювальної апаратури.
Відео сенсорний пристрій (ВСП).	ВСП складається із щілинної діафрагми та відбивника. Фотокамера, яка має змінне вікно, об'єктив, інтерференційний фільтр, фотоприймач на основі ПЗС - матриці. Джерелом освітлення є зварювальна дуга. Використання повторного відбиття освітленої смуги одержує інформацію про зварне з'єднання на фотоприймачі.	Аналізується форма поблизу стику і порівнюється з еталоном, що зменшує помилки.	Жорстко задана програма процесу зварювання.

Продовження табл.4. 1

Основні особливості датчиків положення стику деталей в лазерних технологічних комплексах

Тип датчика	Принцип дії й метод вимірювання відхилення стику від заданої траєкторії	Перевага	Недолік
Датчик відбитого лазерного проміння	Датчик відбитого від поверхні зварювальної ванни лазерного проміння Побудований на базі малогабаритного пірометра, і оснащений інтерференційним фільтром лазерного проміння.	Контролює площу поверхні рідкого металу, що зменшує помилки.	Неможливість контролювати кутові шви у важкодоступних місцях.
Зонduючий лазерний датчик	Зонduючий лазерний датчик є напівпровідниковим імпульсним лазером. Просвічує плазмовий факел вздовж поверхні зварного з'єднання і його проміння фіксується фотодіодом.	Визначається густина паро плазмового каналу, що зменшує помилки.	Громіздкість. Не враховується короблення металу.

Продовження табл.4. 1

Основні особливості датчиків положення стику деталей в лазерних технологічних комплексах

Продовження табл.4. 1

Основні особливості датчиків положення стику деталей в лазерних технологічних комплексах

Тип датчика	Принцип дії й метод вимірювання відхилення стику від заданої траєкторії	Перевага	Недолік
Лазерний оптико акустичний дефектоскоп (ЛОАД)	Принцип дії заснований на оптико акустичному ефекті, котрий полягає у збудженні коротких ультразвукових сигналів імпульсним лазерним випромінюванням. Імпульс попадаючи на об'єкт викликає теплове розширення області, що поглинула лазерне випромінювання. Це призводить до того, що виникає акустична напруга, форма якої визначається параметрами лазерного імпульсу і характеристиками середовища, що поглинуло світлову енергію. Вимірювання глибини залягання неоднорідності визначається по часу затримки. Вимірювання розміру неоднорідності визначається по формі і спектру сигналу.	Можливо виміряти: • глибину залягання неоднорідності; • розмір неоднорідності, що зменшує помилки..	Затрата часу на попереднє дослідження характеристик середовища

Виявлено основні особливості та якісні характеристики датчиків положення стику зварювання тонкостінних конструкцій, а саме:

- тип сучасних датчиків;
- принципи їх дії;
- методи вимірювання відхилення стику від заданої траєкторії;
- переваги;
- недоліки.

Збір та зберігання цієї інформації на підприємстві дозволяє:

- полегшити процедуру визначення кращими за багатьма характеристиками одночасно;
- прискорити процес порівняльного аналізу;
- визначити найкращі 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, за проведеному аналізу встановлено, що кращими слідкуючими датчиками є безконтактні.

Їх робота заснована на оптичних принципах, які мають високу надійність та експлуатаційну технологічність, прикладом яких є датчики на основі ПЗС- матриць, ПЗС лінійок.

При цьому жорсткі вимоги пред'являються до скануючих пристроїв при передачі прийнятої високоточної інформації для її обробки.

Тому в дисертаційній роботі нижчі проведено дослідження множини існуючих скануючих пристроїв.

4.3 Дослідження існуючих компонентів апаратного забезпечення інформаційної системи збору даних і управління

4.3.1 Дослідження множини існуючих лазерних випромінювачів та визначення кращого типу

Організація апаратного забезпечення інформаційної системи збору даних і управління при створенні спеціалізованої інформаційної бази даних оснований на використанні інформаційної технології об'єктивного оцінювання техніко-економічних показників різних типів сучасних компонентів:

- лазерних випромінювачів;
- елементів визначених датчиків (скануючих пристроїв);
- волоконних лазерних модулів

через створення критеріїв видачі релевантної інформації (КВРІ) [1, 13, 18].

Кожний критерій має фізичне тлумачення і вміщує декілька основних параметрів.

Особливість критеріїв видачі релевантної інформації полягає у тому, що відсутня суб'єктивність значень пріоритетних коефіцієнтів у визначених показників, тобто їх значення дорівнює одиниці.

Завдяки цьому нема потреби використовувати високої кваліфікації розробника, що зменшує витрати і, як наслідок зменшується вартість виробу.

Підтвердження сказаного показано на прикладах визначення найбільш якісного із сучасних лазерних випромінювачів за багатьма параметрами для цього створена реляційна модель, яка приведена в табл. 4.2.

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

Параметр	Тип лазерних випромінювачів				
	Викори- стання в промис- ловості	YAG-Nd лазери з ламповим накачуван- ням	YAG-Nd лазери з діодним накачува- нням	Діодні лазери	Волоконні лазери
		1	2	3	4
Р – вихідна потужність, кВт	1...30	1...5	1...4	1...4	1...30
η – ККД, %	$\eta > 20$	2...3	4...6	25...30	2...25
D – дальність доставки випромінювання волоконном	10...300	20...40	20...40	10...50	10..300
Ст – стабільність вихідної потужності, умовн. один.	$\rightarrow 1$	0	0	1	1
Ч – чутливість до зворотного відбиття випромінювання, умовн. одиниць	$\rightarrow 0$	1	1	0	0
М – займана площа, умовн. одиниць	якомога менше	22	18	8	1,0
В – вартість монтажу, експлуатації, обслуговування, умовних одиниць	якомога менше	3	13,4	10,4	0,28
Н- періодичність заміни ламп або лазерних діодів, г	якомога менше	300...500	2000.. ...5000	3000... ...5000	50000..... .70000

За наведеними в табл. 4.3 ТЕП створюється інформаційна модель узагальненого виду

$$\varphi(P_{max}, P_{min}, B_{max}, B_{min}, \eta_{max}, \eta_{min}, H_{max}, H_{min}, C, \text{Ч}, M, D_{max}, D_{min}) \quad (4.1)$$

Узагальнений вид критерію видачі релевантної інформації (КВРІ) має наступний вигляд

$$K_i = (\beta_{i\max} - \beta_{i\min}) / \beta_{i\max}, \quad (4.2)$$

де індекси i_{max} , i_{min} відповідають максимальному, мінімальному i -му вибраному показнику (параметру) відповідно;

$K_p = \frac{P_{max} - P_{min}}{P_{max}}$ — безрозмірна величина, що характеризує енергетичні можливості, краще $\rightarrow max$;

$K_B = \frac{B_{max} - B_{min}}{B_{max}}$ — безрозмірна величина, що характеризує вартість, краще $\rightarrow min$;

$K_\eta = \frac{\eta_{max} - \eta_{min}}{\eta_{max}}$ — безрозмірна величина, що характеризує ККД, краще $\rightarrow max$;

$K_H = \frac{H_{max} - H_{min}}{H_{max}}$ — безрозмірна величина, що характеризує ненадійність, краще $\rightarrow min$;

$K_D = \frac{D_{max} - D_{min}}{D_{max}}$ — безрозмірна величина, що характеризує відстань доставки лазерного випромінювання, краще $\rightarrow max$;

K_{Ct} — безрозмірна величина, що характеризує стабільність вихідної потужності, краще $\rightarrow max$;

$K_{\text{ч}}$ – безрозмірна величина, що характеризує чутливість до зворотного відбиття випромінювання, краще $\rightarrow \min$;

$K_{\text{м}}$ – безрозмірна величина, що характеризує займану площу, краще $\rightarrow \min$.

Кількісне значення KBPI множини лазерних випромінювачів приведено в табл.4.3

Таблиця 4.3

**Результати розрахунків KBPI об'єктивного оцінювання
за відповідними показниками лазерних випромінювачів**

Критерії	Тип лазеру			
	YAG-Nd лазери з лампою накачування	YAG-Nd лазери з діодом накачування	Діодні лазери	Волоконні лазери
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
$K_{\text{р}}$	0,8	0,75	0,75	0,996
$K_{\text{в}}$	3	13,4	10,4	0,28
$K_{\text{Ст}}$	0	0	1	1
$K_{\text{н}}$	0,4	0,6	0,4	0,28
$K_{\text{Д}}$	0,5	0,5	0,8	0,97
K_{η}	0,33	0,33	0,17	0,92
$K_{\text{ч}}$	1	1	0,05	0,03
$K_{\text{м}}$	22	18	8	1
$K_{\Sigma\text{лаз}}$	5,51	4,38	5,49	12,06

Кращій тип лазерного випромінювача визначається через розрахунок за формулою

$$K_{\Sigma\text{лаз}} = \sum_{i=1}^k K_{i\text{max}} + \sum_{j=1}^m \frac{1}{K_{j\text{min}}}. \quad (4.3)$$

Для наведеної множини лазерних випромінювачів табл.4.3 перша сума доданків складається з

$$K_{ip}; K_{ic}; K_{id}; K_{i\eta}; K_{i\chi},$$

де індекси p, c, d, η , χ відповідають табл.4.3,

тоді перша сума має наступний вигляд

$$\sum_{i=1}^{k=5} K_{imax} = K_{ip} + K_{ic} + K_{id} + K_{i\eta} + K_{i\chi}$$

друга сума доданків складається з

$$(1/K_{jv}); (1/K_{jt}); (1/K_{jm}),$$

де індекси v, t, m відповідають табл.4.3,

тоді друга сума доданків має вигляд

$$\sum_{j=1}^{m=3} \frac{1}{K_{min.}} = \frac{1}{K_{jv}} + \frac{1}{K_{jt}} + \frac{1}{K_{jm}}$$

Результати розрахунків кожного узагальненого критерію видачі релевантної інформації $K_{\Sigma\text{лаз}}$ розглянутої множини лазерних випромінювачів приведено у табл. 4.3.

Відомо, що візуалізація забезпечує прийом інформації проектувальником на 3...4 порядку [37] швидші в порівнянні з прийнятою інформацією, що озвучена, тому на рис. 4.1 побудована гістограма

результатів об'єктивного оцінювання лазерних випромінювачів за багатьма параметрами.

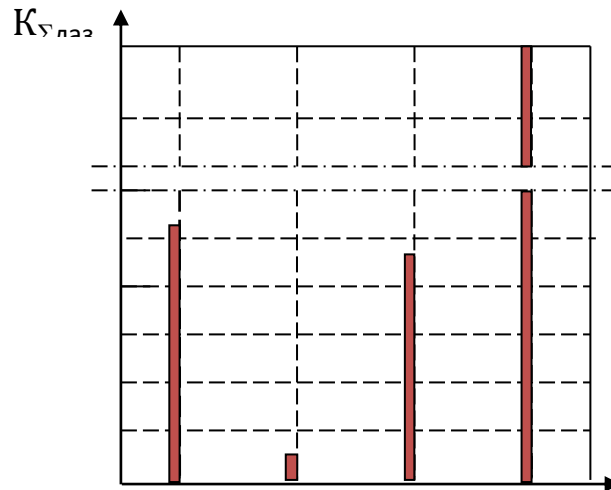


Рис.4. 1. Гістограма узагальнених критеріїв видачі релевантної інформації лазерних випромінювачів

Таблиця 4.3. Значення критеріїв видачі релевантної інформації

Аналіз критеріїв видачі релевантних інформацій показав, що кращим скануючим пристроєм є волоконний лазер за № 4, якій має наступне значення

$$K_{\Sigma\text{лаз}} = 12.1,$$

тобто більш ніж в 2 рази в порівнянні з іншими.

Крім того, до переваг волоконних лазерів традиційно відносять відношення площі резонатора до його об'єму, що забезпечує якісне охолодження, невеликі розміри приладів.

Для YAG-Nd достатньо завести промінь в оптичне волокно для подальшого використання.

Проте для лазерів іншої конструкції потрібно спеціальні оптичні системи колімації та апаратурно забезпечити пристрої нечутливими до вібрацій.

У волоконних лазерах генерація випромінювання відбувається безпосередньо у волокні, яке володіє високою оптичною якістю [18, 20-23].

Завдяки перемогам волоконних лазерів при проектуванні автоматизованих лазерних комплексів інтерес представляють волоконні лазерні модулі, що розглядаються нижчі [1].

4.3.2 Дослідження множини існуючих скануючих пристроїв та визначення кращого типу

На підставі досліджень закордонних і вітчизняних літературних джерел [15, 17, 23, 34-36]., що описують характерні особливості сучасних скануючих пристроїв та можливості їх використання при розробки апаратного забезпечення збору даних створена реляційна модель їх основних технічних показників, що представлено в табл.4.4 .

Таблиця 4.4

Реляційна модель відношень основних технічні показників сучасних скануючих пристроїв різного типу

№ пп	Тип скануючих пристроїв	Параметри					
		$R_{\text{відкр}}$, Ом	f , МГц	P_c , мВт	P_r , 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	K1104KH1	400	2,0	6,7	282, 6	85	10
4	B1110KH1-2	400	1,0	0,1	543,5	25	5
5	733KH1-2	400	0,5	40	500	35	5
6	K591KH3	270	0,5	7,5	282, 6	85	3
7	K590KH6	300	0,5	52,5	282, 6	85	4
8	H1506A-2	1200	0,5	7,5	108,7	125	5

де $R_{\text{відкр}}$ – опір відкритого транзисторного перемикача;

P_c – потужність споживання;

P_p – потужність розсіювання кристалу;

C – ємність навантаження;

T – максимальна температура;

f – робоча частота.

$$P_p = (150 - T) / 0,23 \quad (4.4)$$

Інформаційна модель загального вигляду записується наступним чином

$$\psi(P_c, P_p, f, T, C, R_{\text{відкр}}) \quad (4.5)$$

Аналіз інформаційної моделі загального вигляду показав відсутність аналітичного опису перелічених в (4.5) показників, тому на підставі умовного моделювання, властивості теорії розмірностей та інформаційних систем створюються критерії видачі релевантної інформації (КВРІ). Особливістю КВРІ є використання об'єктивних параметрів, що забезпечує для порівняльного аналізу будувати гістограми та використовувати їх для створення спеціалізованої інформаційної бази даних. Прикладами КВРІ є наступні:

$\frac{P_p}{P_c}$ – безрозмірна величина, що характеризує енергетичний резерв кристалу, краще $\rightarrow \max$;

$f \cdot C \cdot R_{\text{відкр}}$ – безрозмірна величина, що характеризує швидкодію, краще $\rightarrow \max$

За результатами розрахунків побудована образно знакова модель (рис.4.2), за допомогою якої визначено взаємозв'язок між багатьма параметрами: $P_c, P_p, f, T, C, R_{\text{відкр}}$ скануючих пристроїв.

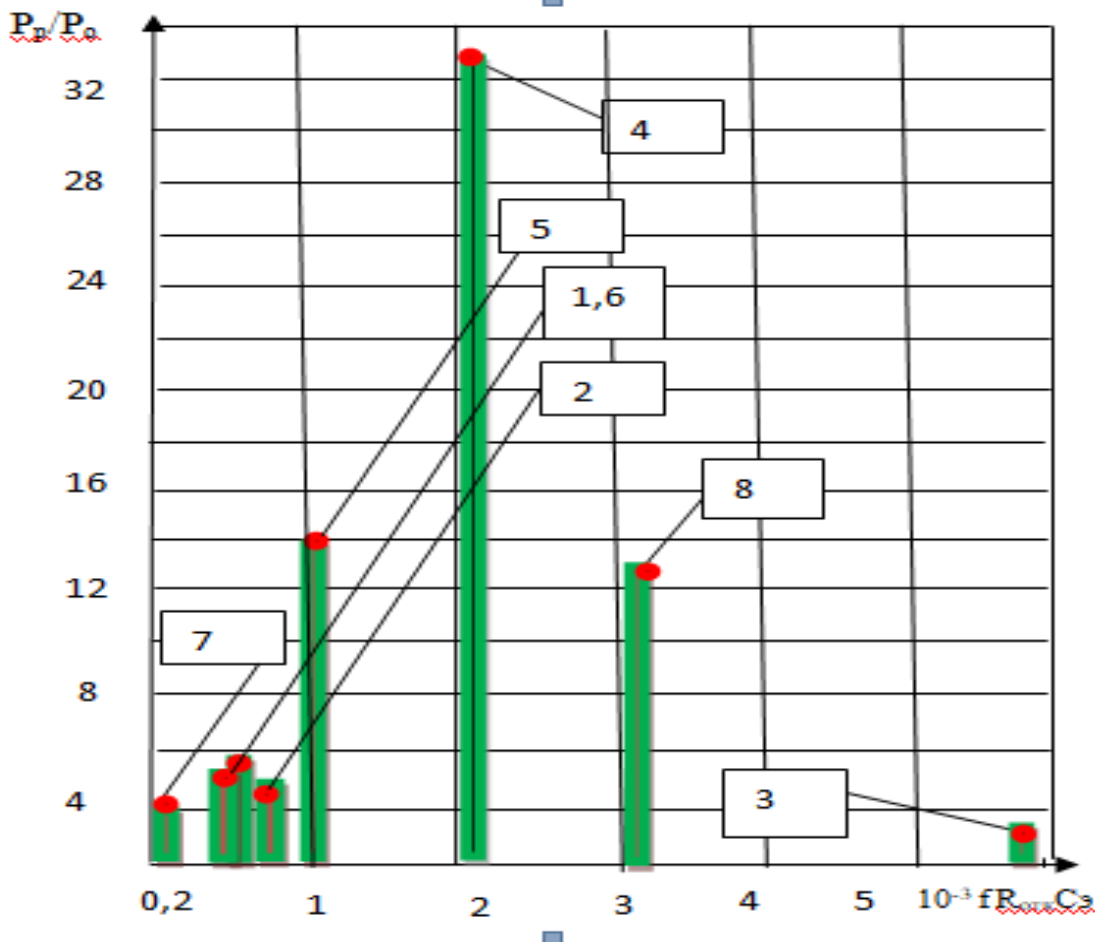


Рис. 4.2. Взаємозв'язок між КВРІ скануючих пристроїв
Цифри 1,...,8 відповідають табл. 4.2

Візуалізація взаємозв'язків між КВРІ (P_p/P_c) та ($f \cdot C \cdot R$) (рис.4.1) підтвердила високу легкість та швидкість процедури вибору кращого компонента по кількісному значенню КВРІ.

Наприклад, КВРІ скануючого пристрою Б1110КН1-2 за № 4, має високе значення (P_p/P_c), що характеризує енергетичний показник кристалу, але його значення ($f \cdot C \cdot R$) у 3 рази менш, ніж у сканеру за № 3, тому пристрій № 4 можливо вдосконалювати.

Наприклад, у пристрою №4 є можливість збільшити частоту зчитування інформації за рахунок зменшення існуючого великого енергетичного резерву кристалу, що зменшує енергочасові та матеріальні витрати майже на 50% порівняно з витратами на розробку нової моделі пристрою.

Особливістю сканеру, що побудований на базі ІС Б1110КН1-2 є малий вхідний інформаційний струм, що дорівнює 10^{-11} А, якій забезпечує високу інформаційну надійність високочутливого датчика.

Крім того, він має передпідсилювач, що виконано в єдиному кристалі, це забезпечує високу експлуатаційну надійність через зменшення інтенсивності відмови майже на 3 порядку.

4.3.3 Дослідження множини волоконних лазерних модулів та визначення кращого типу

За результатами аналізу вітчизняних та закордонних джерел [1, 23, 34-36] інформації про сучасних типах лазерних модулів побудована реляційна модель основних технічних показників сучасних волоконних лазерних модулів різних типів, що представлена в табл.4.5.

Атрибути схеми реляційних моделей є [1]:

- вихідна потужність лазера;
- максимальна нестабільність вихідної потужності;
- потужність споживання лазерного модуля;
- робоча температура: мінімум, максимум;
- дальність передачі по оптоволоконному кабелю.

На основі технічних показників створена інформаційна модель узагальненого вигляду

$$\Psi(P_L; P_M; T_{max}; T_{min}; D_i, D_{max}), \quad (4.6)$$

де P_L – вихідна потужність лазера;

P_M – потужність споживання лазерного модуля;

T_{max} – максимальна робоча температура модуля;

T_{min} – мінімальна робоча температура модуля;

D_i – дальність передачі по оптоволоконному кабелю i -го типа лазерного модуля;

$D_{\max}$ – максимальна дальність передачі по оптоволоконному кабелю

Таблиця 4.5

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

№ п/н	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 оптоволоконному кабелю D , м
					$T_{\min}$	$T_{\max}$	
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

Аналіз множини складових інформаційної моделі узагальненого вигляду (4.6) показав відсутність математичної залежності між наведеними параметрами для моделей волоконних лазерних модулів, тому на підставі інформаційної технології, властивостей теорії умовного моделювання та розмірностей створюються безрозмірні критерії видачі релевантної інформації.

КВРІ та їх фізичне тлумачення розроблені і приведені нижче:

$K_p = \frac{P_L}{P_M}$ – безрозмірна величина, що характеризує енергетичний показник, а саме відношення потужності випромінювання лазера до потужності споживання модуля, краще $K_p \rightarrow \max$;

K_{nc} – величина нестабільності вихідної потужності, краще $K_{nc} \rightarrow \min$;

$K_T = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{max}}$ – безрозмірна величина, що характеризує діапазон робочих температур краще $K_T \rightarrow \max$;

$K_D = \frac{D_{max}}{D_i}$ – безрозмірна величина, що характеризує дальність передачі

променя по оптоволоконному кабелю для визначеної множини

(№1.....№12) відносно $D_{max} = 30\text{м}$, краще $K_D \rightarrow \max$

Для наведеної множини волоконних лазерних модулів (табл.4.5) кращій з них визначається через розрахунок за формулою

$$K_{\Sigma \text{Л мод}} = \sum_{i=1}^k K_{imax} + \frac{1}{K_{imin}} \quad (4.7)$$

Для наведеної множини волоконних лазерних модулів табл. 4.5 перша сума доданків складається з

$$K_{ip}; K_{iD}; K_{iT},$$

де індекси p, t, D відповідають індексам KBPI, тоді перша сума має наступний вигляд

$$\sum_{i=1}^{k=3} K_{imax} = K_{ip} + K_{iT} + K_{iD} = 0,31 + 0,8 + 0,17 = 1,28$$

другий доданок дорівнює

$$\frac{1}{K_{jnc}} = 2$$

$$K_{\Sigma \text{л.мод}} = \sum_{i=1}^k K_{imax} + \frac{1}{K_{imin}} = 1,28 + 2 = 3,28$$

Результати розрахунків кожного узагальненого критерію видачі релевантної інформації $K_{\Sigma \text{л.мод}}$ розглянутої множини волоконних лазерних модулів приведено у табл. 46.

Відомо, що візуалізація забезпечує прийом інформації проектувальником на 3...4 порядку [19] швидші в порівнянні з прийнятою інформацією, що озвучена, тому на рис. 4.3 побудована гістограма результатів об'єктивного оцінювання волоконних лазерних модулів за багатьма параметрами.

Результати розрахунків відповідних критеріїв видачі релевантної інформації наведені в табл. 4.6.

**Результати розрахунків критеріїв видачі релевантної інформації
для визначених сучасних лазерних модулів**

№ пп	КВПІ		K_p	K_C	K_T	K_D
	Тип лазерного модуля					
1	YLR-700-MM-WC-Y14		0,35	3	0,8	0,17
2	ЛС-04		0,20	3	0,75	0,33
3	YLR-700-WC-Y14		0,33	3	0,8	0,17
4	YLR-1000-MM-WC-Y14		0,33	3	0,8	0,17
5	YLR-1000-WC-Y14		0,31	0,5	0,8	0,17
6	JK400FL		0,25	3	0,89	0,33
7	JK50FL		0,20	3	0,89	0,33
8	YLR-150/1500-QCW-AC-Y14		0,17	1	0,75	0,1
9	YLR-300/3000-QCW-MM-AC-Y14		0,10	1	0,71	0,17
10	YLS-600/6000-QCW-AC-Y15		0,10	2	0,71	0,17
11	YLS-2000-U-Y18		0,29	2	0,89	1
12	YLR-2000-MM-WC-Y18		0,38	3	0,8	0,17

Для збереження інформації в умовах підприємства та забезпечення високої швидкості прийому інформації для проектувальника побудовані гістограми, які представлено на рис. 4.3.

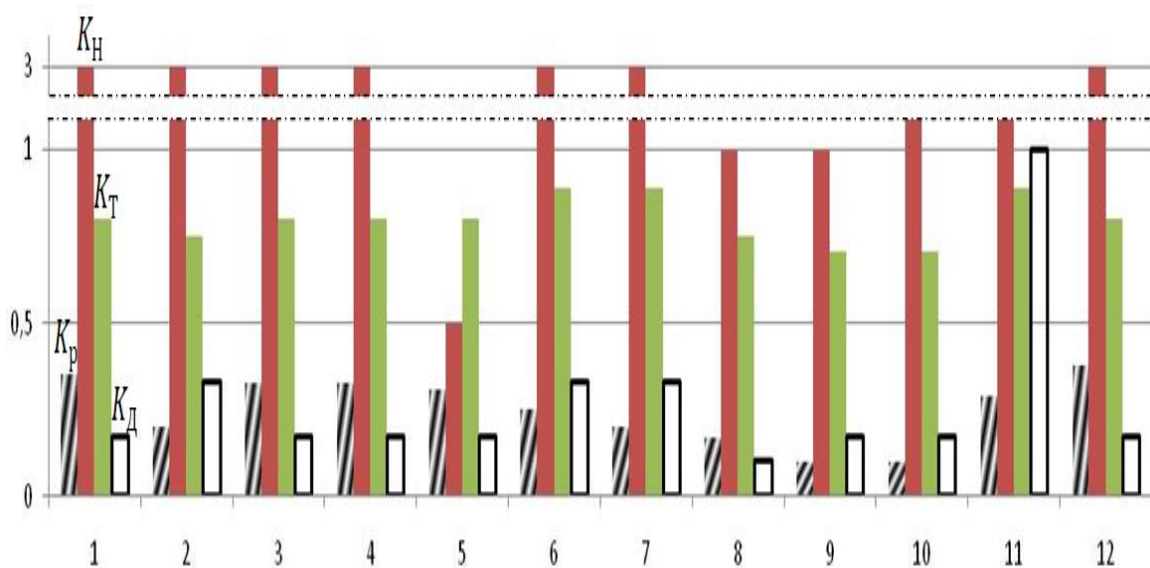


Рис.4.3. Гістограми критеріїв видачі релевантної інформації
об'єктивного оцінювання за багатьма показниками

волоконних лазерних модулів

Примітка: Цифри 1...12 відповідають лазерним модулям табл. 4.6

K_P – смугастий; K_H – коричневий; K_T – зелений; K_D – білий

Аналіз побудованої гістограми показав, що кращій моделлю за сукупністю параметрів являється модуль волоконного лазера за № 5 через мале значення критерію $K_{нс}$, що характеризує нестабільність вихідної потужності та достатньо велике значення K_P , який характеризує енергетичний показник.

Таким чином, узагальнений критерій видачі релевантної інформації за результатом розрахунку

$$K_{\Sigma \text{л мод}} = 3,28$$

показав, що волоконний лазерний модуль моделі

YLR-1000-WC-Y14

являється кращим.

Синтез результатів узагальнених критеріїв видачі релевантної інформації визначених компонентів на підставі інформаційної технології полягає в їх адитивності, що сприяє забезпеченню об'єктивного оцінювання інформаційної системи в цілому.

Верифікація підтверджена розрахунками синтезованих узагальнених критеріїв видачі релевантної інформації на прикладах лазерних випромінювачів, волоконних лазерних модулів та скануючих елементів для датчиків положення зварного стику тонкостінних конструкцій [5]

$$K_{\Sigma \text{ загал}} = K_{\Sigma \text{ лаз}} + K_{\Sigma \text{ л мод}} + K_{\Sigma \text{ скан}} = 12,1 + 3,28 + 34 = 49,38. \quad (4.8)$$

Використання інформаційної технології об'єктивного оцінювання зменшує матеріальні, енергочасові витрати через зменшення витрат на відповідні попередні трудові дослідження технологічної підготовки, особливо це відчутно при умовах дії непередбачених факторів та дрібносерійному виробництві.

Візуалізація критеріїв видачі релевантної інформації при порівняльному аналізі прискорює процес вибору кращих компонентів апаратного забезпечення збору даних і управління, а також процедуру створення спеціалізованої інформаційної бази даних на відповідному підприємстві.

Висновки до розділу 4

У *четвертому розділі* отримала подальший розвиток інформаційна технологія об'єктивного оцінювання багатопараметричних компонентів апаратного забезпечення збору даних і управління при створенні спеціалізованої інформаційної бази даних за допомогою критеріїв видачі релевантної інформації, особливість яких полягає у тому, що значення пріоритетності коефіцієнтів (штрафних функцій та ін.) дорівнює одиниці.

Об'єктивні значення критеріїв видачі релевантної інформації забезпечило можливість:

- будувати їх у вигляді гістограм, візуалізація яких прискорила прийом інформації на 3, ..., 4 порядку;
- зменшити час на процес аналізу та вибір кращих компонентів за багатьма параметрами з множини компонентів і створити спеціалізовану інформаційну базу даних на відповідному підприємстві;
- зменшити вартість виробу через синтез перелічених вищі переваг і зниження вимог до кваліфікації проектанта.

Верифікація підтверджена розрахунками синтезованих КВРІ на прикладах лазерних випромінювачів, волоконних лазерних модулів та скануючих елементів для датчиків положення зварного стику тонкостінних конструкцій.

Список використаних джерел

[52] 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,

- [53] 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>).
- [54] . 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", *Nauka i studia*, Przemysl, № 24-7 (161), pp. 16-20, 2016.
- [55] 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.
- [56] 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.
- [57] 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.
- [58] 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.

- [59] А. Г. Лукашенко, О. А. Кулигін, та В. М. Лукашенко, "Виявлення резерву предмета дослідження на основі теорії неповної подібності та розмірностей", *Вісник Хмельницького національного університету*, № 3, с. 184-187, 2009.
- [60] 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.
- [61] Критериальная оценка лазерных излучателей на основе теории неполного подобия и размерностей / А. Г. Лукашенко, В. М. Лукашенко, М. В. Чичужко, Е. А. Слись, Н. Н. Чиж, А. В. Сташко // *Бъдещите изследвания – 2013 : материали IX Международна научна практична конференция : (17 – 25 февруари 2013, София, България).* – София : «Бял ГРАД-БГ» ООД, 2013. – Т. 28. – С. 24–28.
- [62] Многокритериальный анализ лазерных излучателей на основе теории неполного подобия и размерностей / В. М. Лукашенко, А. Г. Лукашенко, Т. Ю. Уткина, А. В. Сташко, Н. Н. Чиж, Е. А. Слись // *Strategiczne pytania światowej nauki – 2013 : materiały IX Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji : (07-15 lutego 2013 roku, Przemyśl, Polska).* – Przemyśl : Nauka i studia, 2013. – Т. 28. – С. 75–78.
- [63] Лукашенко В. М. Многокритериальная модель качественной оценки современных импульсных рефлектометров / В. М. Лукашенко, Т. Ю. Уткина, А. В. Гревцов // *Сучасні наукові дослідження представників технічних наук – прогрес суспільства майбутнього : матеріали Міжнарод. наук.-практ. конф. : (15-16 бер. 2013 р., м. Київ).* – Київ : Науково-технічне об'єднання «Потенціал», 2013. – С. 43–49.
- [64] Єдиний узагальнений показник якості для компонентів мікропроцесорних систем / А. Г. Лукашенко, С. А. Галушка, А. В. Гавриш, А. О. Циба, В. М. Лукашенко // *«Ключови въпроси в съвременната наука –*

2014» : матеріали X Міжнародна научна практична конференція : (17 – 25 квітень 2014 г., Софія, Болгарія). – Софія : «Бял ГРАД-БГ» ООД, 2014. – Т. 35. – С. 3–9.

[65] Процедура ускоренного выбора лучших материнских плат / В. М. Лукашенко, И. А. Зубко, А. Г. Лукашенко, К. С. Рудаков, В. А. Лукашенко // «Zprávy vědecké ideje – 2014» : materiály X mezinárodní vědecko-praktická konference (27.10-05.11.2014 roku, Praha). – Praha: “Education and Science”, 2014. – Díl. 12. – С. 36-41.

[66] Determination Method of Efficiency Units for Conditional Similarity Criterion / V. M. Lukashenko, M. V. Chichuzhko, D. A. Lukasheneko, V. A. Lukasheneko // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2013. – № 2. – С. 44–47, ISSN 2306-4412.

[67] Д. А. Лукашенко, В. Ю. Хаскин, А. Г. Лукашенко, А. В. Сиора, А. В. Бернацкий (2011). Сварка тонколистовой нержавеющей стали волоконным лазером. Вестник ДНУ. Ракетно-космическая техника, т. 19, №4: 121-129.

[68] A. Nobuyuki, F. Yoshinori, I. Takashi, T. Masahiro (2005). Micro Welding of Thin Stainless Steel Foil with a Direct Diode Laser. Transactions of JWRI. – Vol. 34. №1.: 19-23.

[69] А. Г. Лукашенко, В. М. Лукашенко, С. А. Міценко та ін. (2010). Основні характерні особливості сучасних лазерів. VI Міжнародна научна практична конференція Т. 23.: 9–12.

[70] А. Г. Лукашенко (2014). Математична модель узагальненого показника якості компонентів лазерного технологічного обладнання. Вісник Хмельницького національного університету, № 4: 31-36.

[71] T. Gottwald et al. (2012). Recent disk laser development at TRUMPF. Proc. SPIE 8547, High-Power Lasers 2012: Technology and Systems, 85470C.

[72] Y. Peng et al (2013). Near fundamental mode 1.1 kW Yb:YAG thin-disk laser. Opt. Lett. 38: 1709-1711.

- [73] A. Carter, B. Samson, K. Tankala, D. P. Machewirth, V. Khitrov, U. H. Manyam, F. Gonthier, F. Seguin. Damage Mechanisms in Components for Fibre Lasers and Amplifiers», Proc. of SPIE Vol. 5647.
- [74] Mazurets A.V. (2015). Features of using of the information technology of automated definition of terms in educational materials. Materials of the IV International Scientific Conference «Information-Management Systems and Technologies» 22th – 24th September: C.62.
- [75] 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.
- [76] Лукашенко А.Г. Развитие методов та моделей энергоеффективных компонентов компьютерно-интегрированных систем ресурсосберегающего технологического оборудования специального назначения : дис. докт. техн. наук : 05.13.05. Черкаси: ЧДТУ, 2021. 383 с.
- [77] Майзель М.М. Основы автоматизации и автоматизации производственных процессов, 1964, 580с.
- [78] Пасковатый О.И. Основы автоматизации производства, 1991, 144 с.
- [79] www.expert.ru, Валерий Райский, Цикл статей «Системы слежения при автоматической сварке» Часть I,II,IV,V
- [80] Раннев Г.Г. Информационно-измерительная техника и технологии, 2002, 456 с.
- [81] Гладков Э. А. Управление процессами и оборудованием при сварке. — М.: «ИЦ Академия», 2006.
- [82] Аш Ж. Датчики измерительных систем / пер. с франц. под ред. А.С. Обухова. — М.: Мир. — Кн. 2. 1992. — 460 с.
- [83] Аш Ж. Датчики измерительных систем / пер. с франц. под ред. А.С. Обухова. — М.: Мир. — Кн. 1. 1992. — 480 с.

- [84] Окоси Т. и др. Волоконно-оптические датчики / под ред. Т. Окоси: Пер. с япон. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. – 256 с.
- [85] Лукашенко В.М. К вопросу повышения качества многоэлементных фотоемкостных приемников // Радиоэлектроника и информатика. - 1999. - №3. - С. 12-13.
- [86] Лукашенко В.М., Лукашенко А.Г. Устройство для коммутации каналов с произвольной выборкой // Труды XXXIII Науч.-практ. конф. Посвященная Дню радио «Радиотехника». Новосибирск: НТОРЭС им. А.С. Попова. - 1990. – С. 61- 62.
- [87] Лукашенко В.М. Multielement Solidstate Receivers of Radiation // International Conference on Optoelectronic Information Technologies "PHOTONICS-ODS 2000". Ukraine, Vinnytsia: VSTU. - 2000. - P.25.
- [88] Автоматизированные системы управления технологическими процессами (справочник) / А.З. Грищенко, В.П. Грищук, В.М. Денисенко и др. Под ред. акад. Б.Б. Тимофеева – К.: Техника, 1983. – 351 с.

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 (KBPI) 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, керуючи 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 (штрафних функцій та ін.) дорівнює одиниці. Візуалізація KBPI 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 KBPI 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 ≤ 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.

Додаток

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

- [89] 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*. Черкассы, 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.
- [90] 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.
- [91] Д. А. Гардер, "Інформаційна технологія параметричної оптимізації режимів автоматизованого лазерного зварювання в умовах невизначеності", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 1, с. 133-143, 2021.
- [92] 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.
- [93] 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.
- [94] А. Г. Лукашенко, С. Ф. Аксьонов, Д. А. Гардер, К. С. Рудаков, В. А. Лукашенко, Е. В. Воропай, та В. М. Лукашенко, "Метамодель

обчислювача функції «квадратного кореня» спеціального призначення", *Nauka i studia, Przemysl*, № 11 (191), pp. 17-25, 2018.

- [95] 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>).
- [96] 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", *Nauka i studia, Przemysl*, № 16 (177), pp. 32-38, 2017.
- [97] 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", *Nauka i studia, Przemysl*, № 24-7 (161), pp. 16-20, 2016.
- [98] 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.
- [99] 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.
- [100] 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.

- [101]А. Г. Лукашенко, Т. В. Мельниченко, и Д. А. Лукашенко, "Лазерная сварка тонколистовой нержавеющей стали модулированным излучением", *Автоматическая сварка*, № 4, с. 19-23, 2012.
- [102]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.
- [103]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.
- [104]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.
- [105]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.
- [106]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.
- [107]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.
- [108]А. Г. Лукашенко, Д. А. Лукашенко, А. В. Бернацкий, В. П. Гарашук, и В. И. Луценко, "Лазерная сварка тонколистовой нержавеющей стали", *Автоматическая сварка*, № 4, с. 45-49, 2011.

- [109] 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.
- [110] А. Г. Лукашенко, К. С. Рудаков, Р. Є. Юпин, та Д. А. Лукашенко, "Швидкодіючий метод візуалізації вибору сучасних мікроконтролерів", *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, № 4/9 (52), с. 63-65, 2011.
- [111] А. Г. Лукашенко, К. С. Рудаков, Р. Є. Юпин, та Д. А. Лукашенко, "Методологія удосконалення моделі однокристального мікроконтролера", *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, № 5/9 (53), с. 51-54, 2011.
- [112] 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.*
- [113] 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.
- [114] 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.
- [115] А. Г. Лукашенко, Д. А. Лукашенко, В. М. Лукашенко, М. Н. Озирская, и В. А. Лукашенко, "Физическая модель трехкоординатного технологического комплекса на базе CO₂-Laser", *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. праць Кіровоград. нац. техн. ун-ту, Кіровоград: КНТУ, вип. 24, с. 77-82, 2011.*

- [116] А. Г. Лукашенко, Д. А. Лукашенко, В. А. Лукашенко, та В. М. Лукашенко, "Високонадійний багатофункціональний обчислювач для спеціалізованих лазерних технологічних комплексів", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 1, с. 67-70, 2011.
- [117] 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.
- [118] А. Г. Лукашенко, "Модель каскадов управления транзисторными переключателями в лазерных комплексах", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 3, с. 21-25, 2011.
- [119] 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.
- [120] 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 CO₂ basis", *Nauka i studia, Przemysl*, №. 8 (30), pp. 81-88, 2010.
- [121] А. Г. Лукашенко, О. А. Кулигін, та В. М. Лукашенко, "Виявлення резерву предмета дослідження на основі теорії неповної подібності та розмірностей", *Вісник Хмельницького національного університету*, № 3, с. 184-187, 2009.
- [122] 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.*

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

- [123] 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.

- [124] А. Г. Лукашенко, И. 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.
- [125] В. В. Корнух, А. Г. Лукашенко, И. 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.
- [126] 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.
- [127] 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. София: Бял ГРАД-БГ ООД, 2013, т. 27, с. 48-51.
- [128] 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.
- [129] 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 *VIII МНПК Новината за напреднали наука – 2012*, София, Болгария, мая 17-25, 2012. София: Бял. ГРАД-БГ ООД, 2012, т. 24, с. 3-8.

- [130] 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.

Публікації, які додатково відображають наукові результати дисертації

- [131] 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.
- [132] 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.
- [133] 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.
- [134] 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.
- [135] 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.

- [136] 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.*
- [137] 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.*
- [138] 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 С2 Україна, № а 2013 14855, заявл. Груд. 18, 2013, опубл. Серп. 10, 2015, Бюл. № 15.*
- [139] 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.*

ДОДАТОК В

АКТ

Про використання пристроїв, захищених патентами України.

№ 121939 МПК G 06F 5/00,
№ 119006 МПК G 06F 5/00,
№ 115415 МПК H 03M 1/66,
№ 111808 МПК G 06F 9/00,
№ 111459 МПК G 06F 7/00,
№ 107544 МПК G 06F 5/00,
№ 109328 МПК B 23K 26/21

Ми, які підписалися нижче, склали цей акт про те, що розроблені на кафедрі робототехніки та спеціалізованих комп'ютерних систем Черкаського державного технологічного університету пристрої, що захищені патентами на винахід України: №121939 МПК G 06F5/00, №119006 МПК G 06F5/00, №115415 МПК H 03M1/66, № 111808 МПК G 06F 9/00, №111459 МПК G 06F 7/00, № 107544 МПК G 06F5/00, №109328 МПК B 23K 26/21 (Автори: Лукашенко А.Г., Гардер Д.А., Зубко І.А., Рудаков К.С., Лукашенко В.А. та інші) пропонуються до використання в конструкторсько-технологічній документації, розробляється у ТОВ «ЛАЗЕР ЦВМ» виробів спеціальної лазерної техніки.

Директор ТОВ «ЛАЗЕР ЦВМ»

Ю.О.Прітченко



Ректор Черкаського державного технологічного університету

О.О. Григор



АКТ
ПРО ВИКОРИСТАННЯ ПРИСТРОЇВ,
захищених патентами України

№77797, МПК G06G 7/26 (2006.01);

№80851, МПК G06G 7/26 (2006.01);

№84131, МПК (2013.01) G02B 13/00, G02B 15/00, G02B 9/00;

№88085, МПК (2006.01) G06G 7/26;

№89784, МПК (2014.01) G06F 5/00;

№91940, МПК (2014.01) G02B 23/00, E06B 3/00, G01M 9/00

Ми, ті що підписалися нижче, склали цей Акт про те, що розроблені на кафедрі спеціалізованих комп'ютерних систем Черкаського державного технологічного університету пристрої, захищені патентами України №77797, МПК G06G 7/26 (2006.01); №80851, МПК G06G 7/26 (2006.01); №84131, МПК (2013.01) G02B 13/00, G02B 15/00, G02B 9/00; №88085, МПК (2006.01) G06G 7/26; №89784, МПК (2014.01) G06F 5/00; №91940, МПК (2014.01) G02B 23/00, E06B 3/00, G01M 9/00 (автори: В.М. Лукашенко, В.І. Гордієнко, А.Г. Лукашенко, В.А. Лукашенко, І.А. Зубко та інші) пропонуються до використання в конструкторській документації розроблюваних НВК "Фотоприлад" виробів спеціальної техніки.

Заступник генерального директора
 НВК "Фотоприлад" з наукової роботи,
 головний конструктор



В.І. Гордієнко

“ ” 2014 р.

Ректор Черкаського державного
 технологічного університету,
 д.е.н., професор



Т.М. Качала

2014 р.



ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
НАУКОВО-ВИРОБНИЧИЙ КОМПЛЕКС
«ФОТОПРИЛАД»

вул. Б. Вишневецького, 85, м. Черкаси, Україна, 18000
тел.: (0472) 36-03-08
факс: (0472) 37-45-31
E-mail: photopribor@ic.ck.ua

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ КОМПЛЕКС
«ФОТОПРИБОР»

ул. Б. Вишневецького, 85, г. Черкассы, Украина, 11
тел.: (0472) 36-03-08
факс: (0472) 37-45-31
E-mail: photopribor@ic.ck.ua



ДОВІДКА

про наукову значимість, практичне використання і можливості впровадження у виробництво результатів держбюджетної теми №203-13 «Базові компоненти мікропроцесорних систем керування лазерними технологічними комплексами на основі таблично-алгоритмічних методів, моделей та теорії неповної подібності»

Актуальність та необхідність виконання держбюджетної теми №203-13 «Базові компоненти мікропроцесорних систем керування лазерними технологічними комплексами на основі таблично-алгоритмічних методів, моделей та теорії неповної подібності» зумовлена необхідністю підвищення ефективності мікропроцесорних систем керування процесами високоякісного лазерного зварювання тонкостінних конструкцій шляхом розвитку теорії, методів, багатofункціональних, високонадійних моделей компонентів локальних підсистем спеціалізованого лазерного технологічного обладнання.

Для вирішення цієї проблеми, авторами даної науково-дослідної роботи під керівництвом д.т.н., професора Лукашенко В.М. були розроблені та виготовлені:

- образно-знакова багатокритеріальна модель техніко-економічних показників мікроконтролерів для різних фірм виробників, особливість якої полягає в тому, що використовуються властивості теорії неповної подібності та розмірностей, значення критеріїв носять об'єктивний характер. Візуалізація запропонованої моделі дозволяє зменшити час вибору відповідної фірми з найкращими показниками;

- метод визначення енергетичних і швидкісних характеристик мікроконтролерів та супервізорів живлення й напрямку їх вдосконалення на основі теорії неповної подібності та розмірностей. Відмінною особливістю є те, що запропонований метод сприяє визначенню

найкращої моделі за багатьма параметрами одночасно та здатності до розширення функціональних можливостей сучасних мікроконтролерів;

- модель алгоритму визначення енергетичних і швидкісних можливостей мікроконтролерів та супервізорів живлення й напрямку вдосконалення відповідних моделей на основі теорії неповної подібності та розмірностей, яка дозволяє розширити техніко-експлуатаційні характеристики кінцевих виробів. Програмне забезпечення створене на основі цього алгоритму полегшує і прискорює процес вибору необхідної моделі;

- фізична науково-технічна модель дослідження мікроконтролерів, яка використовується при виконанні лабораторних та курсових робіт. Відмінною особливістю є візуалізація процедури дослідження.

Результати досліджень захищені патентами України.

Як показують патентні дослідження, а також аналіз технічної літератури та інформаційних джерел Internet, результати, які отримані авторами, не мають аналогів в Україні та країнах СНД.

Враховуючи вказані переваги, а також наявну апробацію результатів даної науково-дослідної роботи у вигляді статей в провідних наукових виданнях та доповідей на міжнародних конференціях, ми зацікавлені та розглядаємо можливість щодо впровадження вказаних результатів у своєму виробництві за наявності відповідних замовлень та фінансування.

Заступник директора

НВК "Фотоприлад"

з наукової роботи,

головний конструктор,

доктор технічних наук



В.І. Гордієнко

АКТ

о перспективности внедрения устройств, защищенных

патентами Украины

№40178, МПК G06F 5/00;

№44833, МПК G06F 5/02;

№53450, МПК G06G 7/00;

№72952, МПК (2012.01) G06F 5/00;

№89784, МПК (2014.01) G06F 5/00

Мы, нижеподписавшиеся, составили настоящий акт о том, что разработанные на кафедре специализированных компьютерных систем Черкасского государственного технологического университета устройства, защищены патентами Украины №40178, МПК G06F 5/00; №44833, МПК G06F 5/02; №53450, МПК G06G 7/00; №72952, МПК (2012.01) G06F 5/00; №89784, МПК (2014.01) G06F 5/00 (авторы: В.А. Лукашенко, А.Г. Лукашенко, Д.А. Лукашенко, В.М. Лукашенко, М.В. Чичужко, К.С. Рудаков, С.А. Миценко, И.А. Зубко и другие), являются перспективными для внедрения в конструкторской документации установки, разрабатываемой в Институте энергетики Академии наук Молдавии в рамках инициативной международной украинско-молдавской научно-исследовательской работы «Электродуговая установка с улучшенной электромагнитной совместимостью с электрической сетью», выполняемой по соглашению № 2200/3-2014 от 05.05.2014 г. (№ Госрегистрации НДР 0114u004491) под руководством заведующего лабораторией Зайцева Д.А. – с молдавской стороны и Спивака В.М. – с украинской стороны.

Директор Института энергетики
Академии наук Молдавии
д.т.н., профессор



К.С. Тыршу

2015 г.

Ректор Черкасского
технологического университета,
д.э.н., профессор



Т.М. Качала

“ 02 ” 05 2015 г.

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Ректор Черкаського
державного університету
Григор О.О.

АКТ

ВПРОВАДЖЕННЯ

Ми, які підписалися нижче, начальник навчально-методичного відділу к.е.н., доцент Мильніченко С.М., декан факультету інформаційних технологій і систем, к.т.н., доцент Чепинога А.В., зав. кафедри РСКС, д.т.н., професор Лукашенко В.М. підтверджуємо, що основні результати дисертаційної роботи Гардера Д.А. за темою «Інформаційна технологія прийняття рішень для управління автоматизованим лазерним зварюванням тонкостінних конструкцій» впроваджено в навчальний процес кафедри робототехніки та спеціалізованих комп'ютерних систем ЧДТУ в лекційний курс дисципліни: «Формування сигналів в автоматизованих системах управління технологічними процесами і виробництвом».

Результати дисертаційних розробок та досліджень використовувались при підготовці випускних кваліфікованих робіт бакалаврів та магістрів за спеціальністю: «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології».

Начальник навчально-методичного відділу
к.е.н., доцент

С.М. Мильніченко

Декан ФІТІС
к.т.н., доцент

А.В. Чепинога

Зав. кафедри робототехніки та
спеціалізованих комп'ютерних систем
д.т.н., професор

В.М. Лукашенко