

УДК 621.791.05

DOI [https://doi.org/10.15589/znpp2025.2\(500\).8](https://doi.org/10.15589/znpp2025.2(500).8)IMPROVING THE QUALITY OF WELDED JOINTS
OF MANGANESE-COPPER ALLOYSПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ
МАРГАНЦЕВО-МІДНИХ СПЛАВІВ**Nataliia Yu. Lebedieva**

nataliia.lebedieva@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0002-4006-78897

Yuliia O. Kazymyrenko

yuliia.kazymyrenko@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0002-7120-8226

Andrii V. Obrubov

andrii.obrubov@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0001-9667-1703

Н. Ю. Лебедєва,

канд. техн. наук, доцент

Ю. О. Казимиренко,

докт. техн. наук, доцент

А. В. Обрубов,

докт. техн. наук, професор

*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv**Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв*

Abstract. The relevance of the work is due to the economical use of expensive scarce alloys of the Mn-Cu system, which is possible through the use of welded joints based on them. Experimental studies were carried out on the example of an alloy of the grade G60D37X3/G60D37X3 and bimetal G60D37X3/St3. Argon arc welding with a tungsten electrode without an additive was used, for which plates cut from forged bars were used. *The purpose of the work* is to study the effect of heat treatment and develop practical recommendations for obtaining high-quality welded joints of Mn-Cu alloys. *The object of research is the processes* of structure formation and hardness increase under the influence of thermal cycles in the weld metal and the zone of thermal influence. *The subject of research is the* formation of high-quality welded joints of the alloy grade G60D37X3. *Research methods:* the quality of welded joints was evaluated according to the results of microstructural studies of the structure of the weld metal and the structure of the thermal impact zone; control over hardness measurements was chosen as a criterion. *The results of the studies* showed satisfactory weldability by argon arc welding of samples of alloy grade G60D37X3 both with each other and in the formation of a bimetallic joint with carbon steel grade St3. Comparison of the results of microstructural studies with hardness measurements after welding and various types of heat treatment showed the feasibility of using the aging operation after welding at a temperature of 450 °C for 2 hours. Recommendations have been developed to ensure the desired characteristics of power sources in argon arc welding. *Scientific novelty* of the results obtained: scientific ideas about the weldability of manganese-copper alloys by argon arc welding were further developed. *The practical value* of the work lies in the developed recommendations for improving the quality of welded joints G60D37X3/G60D37X3 and G60D37X3/St3. *Prospects for further research* are related to the study of the ability of welded joints to work in aggressive environments and the cyclic loads.

Key words: argon arc welding; power sources; hardness; structure; heat treatment; alloys of the Mn-Cu system.

Анотація. Актуальність роботи зумовлена економічним використанням дороговартісних дефіцитних сплавів системи Mn-Cu шляхом застосування зварних з'єднань на їх основі. Експериментальні дослідження виконані на прикладі сплаву марки Г60Д37Х3: отримано зразки зварних з'єднань Г60Д37Х3/Г60Д37Х3 і біметалу Г60Д37Х3/Ст3. Застосовано аргонодугове зварювання вольфрамовим електродом без присадки, для чого використано пластинки, вирізані з кованих прутків. *Метою роботи* є дослідження впливу термічної обробки і розробка практичних рекомендацій щодо отримання якісних зварних з'єднань сплавів системи Mn-Cu. *Об'єкт дослідження* – процеси формування структури і підвищення твердості під впливом термічних циклів у металі шва і зоні термічного впливу. *Предмет дослідження* – формування якісних зварних з'єднань сплаву марки Г60Д37Х3. *Методи досліджень:* якість зварних з'єднань оцінено за результатами мікроструктурних досліджень структури металу шва і структури зони термічного впливу; як критерій обрано контроль за вимірюваннями твердості. *Результати досліджень* показали задовільну зварюваність аргонодуговим зварюванням

зразків сплаву марки Г60Д37Х3 як між собою, так і при формуванні біметалевого з'єднання з вуглецевою сталлю марки Ст3. Зіставлення результатів мікроструктурних досліджень з вимірюваннями твердості після зварювання і різних видів термічної обробки показали доцільність застосування після зварювання операції старіння при температурі 450 °С протягом 2 годин. Розроблено рекомендації щодо забезпечення бажаних характеристик джерел живлення при аргонодуговому зварюванні. *Наукова новизна* отриманих результатів: отримало подальший розвиток наукові уявлення про зварюваність марганцево-мідних сплавів аргонодуговим зварюванням. *Практична цінність* роботи полягає у розроблених рекомендаціях щодо підвищення якості зварних з'єднань Г60Д37Х3/Г60Д37Х3 і Г60Д37Х3/Ст3. *Перспективи подальших досліджень* пов'язані з дослідженнями спроби зварних з'єднань працювати в умовах агресивних середовищ і термоциклічних навантажень.

Ключові слова: аргонодугове зварювання; джерела живлення; твердість; структура; термічна обробка; сплави системи Mn-Cu.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Розвиток технологій створення функціональних матеріалів зі спеціальними властивостями ґрунтується на наукових уявленнях про мартенситні перетворення у металах і сплавах, під дією яких відбуваються незвичайні механічні ефекти, такі як пам'ять форми (відновлення первинної форми попередньо деформованого виробу під дією теплових ефектів), висока демпфірувальна здатність, надпружність тощо. Їх застосування вважається важливим стратегічним напрямком. Вони забезпечують надійну експлуатацію з'єднувальних елементів у літальних апаратах (кріофітінги для з'єднання трубопроводів військових літаків) [1, с. 82], електричних контактних з'єднань [2, с. 85–96], застосовуються для виготовлення технологічного оснащення рятувальних суден [3] та виготовлення арматури залізобетонних балок будівельних конструкцій [4, с. 4–14]. Це дороговартісні і дефіцитні сплави систем Au–Cd, Ti–Al, Cu–Zn–Al, Mn–Cu та інші. Зниження вартості і металоємкості елементів можливо за рахунок впровадження технологій зварювання, напilenня покриттів, виготовлення композиційних матеріалів. Тому тематика роботи є актуальною.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

В роботі [5, с. 19–34] проаналізовано сучасний стан і перспективи використання функціональних матеріалів з пам'яттю форми. В основу аналізу покладено досвід Інституту металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України. Автор концентрує увагу на явищах термопружної рівноваги при фазових перетвореннях мартенситного типу, який експериментально підтверджений на сплавах Ti–Ni, Cu, Fe та ін. Утворення інтерметалідних сполук типу NiTi, NiTi₂ і Ni₃Ti надають зміцнювального ефекту поряд з пластичністю і демпфірувальними властивостями. В роботі [6, pp. 457–467] теоретично обґрунтована та експериментально підтверджена можливість підвищення демпфірувальної здатності титанових сплавів типу ВТ шляхом нанесення плазмового покриття з нікеліду титану із порошку марки ПН55Т45. Нанесення шару ($\delta = 0,5$ мм) плазмового покриття з порошку ПН55Т45 на пластину з ВТ14 підвищує коефіцієнт розсіювання

енергії більш ніж у 4 рази, що пояснюється мартенситною структурою загартованого покриття та наявністю NiTi. Закономірності впливу термічної обробки на фізико-механічні властивості високодемпфірувальних марганцево-мідних сплавів були встановлені автором в роботі [7]. З метою економії дефіцитних металів і надання спеціальних властивостей (корозійної стійкості, жаростійкості, стійкості до абразивного зношування) доцільно використовувати біметалеві з'єднання, для формування яких застосовуються спеціальні види зварювання [8, с. 181–203].

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Спеціальні марганцево-мідні сплави застосовуються для виготовлення деталей, що працюють в умовах циклічних навантажень. У загартованому стані всі сплави системи Mn–Cu, як з кубічною решіткою, так і ті, що зазнають мартенситного перетворення, мають невеликі значення твердості і міцності. Старіння в діапазоні температур приводить до підвищення міцнісних характеристик і зниження пластичності. Проте вплив термічної обробки на формування якісних зварних з'єднань вивчений недостатньо.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є дослідження впливу термічної обробки і розробка практичних рекомендацій щодо отримання якісних зварних з'єднань сплавів системи Mn–Cu.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Матеріали і методи досліджень. Експериментальні роботи проведені з використанням зразків сплаву марки Г60Д37Х3 (мас. %: 60 % Mn; 37 % Cu; 3 % Cr), пластинки яких товщиною 4...6 мм вирізані з кованих прутків. За допомогою аргонодугового зварювання вольфрамовим електродом без присадок отримано два різновиди з'єднань (табл. 1), які далі використані для мікроструктурних досліджень (мікроскопи ММР-2Р) та вимірювань твердості за Віккерсом (прилад ТПП-10 з навантаженням на індентор 100 Н). Мікронзондовий рентгеноспектральний аналіз (МРСА) виконаний за допомогою електронного мікроскопа-мікроаналізатора РЕММА-102-02.

Таблиця 1. Режими зварювання і постановка досліджень

Зварне з'єднання	Режими зварювання	Теоретичні і експериментальні дослідження
Г60Д37Х3/ Г60Д37Х3	$I_{зв} = 150 \text{ A}$ $U_d = 12 \text{ B}$	1. Дослідження структури металу шва і зони термічного впливу 2. Аналіз характеру розподілу твердості 3. Дослідження впливу термічної обробки на якість та структуру металу шву
Г60Д37Х3/ Ст3	$I_{зв} = 100 \text{ A}$ $U_d = 10 \text{ B}$	

Джерело: складено авторами

Об'єкт дослідження – процеси формування структури і підвищення твердості під впливом термічних циклів у металі шва і зоні термічного впливу.

Предмет дослідження – формування якісних зварних з'єднань сплаву марки Г60Д37Х3.

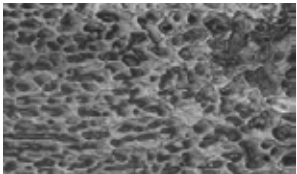
ОСНОВНА ЧАСТИНА

Якість зварних з'єднань оцінено за результатами мікроструктурних досліджень структури металу шва і структури зони термічного впливу (ЗТВ); як критерій обрано контроль за вимірюваннями твердості. Результати оптичної металографії показали відсутність у них тріщин та інших видів дефектів.

Дослідження зварних з'єднань Г60Д37Х3/Г60Д37Х3.

Мікрофотографії металу шва і ЗТВ і особливості структури зварного з'єднання Г60Д37Х3/Г60Д37Х3 наведено у табл. 2.

Таблиця 2. Результати досліджень мікроструктури зварних з'єднань Г60Д37Х3/Г60Д37Х3

Мікрофотографія зварного з'єднання	Особливості структури
<i>Метал шва</i>	
 Оптична мікрофотографія металу шва × 330	Метал шва має дендритну будову. Результати МРСА показали наявність ділянок, збагачених та збіднених на марганець, що є наслідком дендритної ліквіації, яка відбувається під час кристалізації металу шва.
<i>Зона термічного впливу</i>	
 Оптична мікрофотографія зони термічного впливу, × 330	На границі сплавлення зразків спостерігаються ділянки підплавлення, які утворюються у місцях, збагачених на мідь

Джерело: складено авторами

Результати вимірювань твердості у поперечному напрямку мікрошліфа зварного з'єднання показали, що твердість основного металу складатиме 1400 МПа. У зоні термічного впливу HV поступово знижується до рівня твердості металу шва ($HV = 1000 \text{ МПа}$), що зумовлено наявністю високо-температурної γ -фази, яка фіксується під час охолодження за зварювальним термічним циклом. Такий стан металу шва може призвести до втрати демпфірувальних властивостей і, як наслідок, неможливості працювати в умовах динамічних навантажень і вібрацій. Тому в роботі було запропоновано додаткову термічну обробку зразків на наступними режимами: гартування при $t = 800 \text{ }^\circ\text{C}$ протягом 15 хв; гартування при $t = 800 \text{ }^\circ\text{C}$ протягом 15 хв і старіння при $t = 450 \text{ }^\circ\text{C}$ протягом 2 год; старіння при $t = 450 \text{ }^\circ\text{C}$ протягом 2 год. Узагальнені результати вимірювання твердості зразків наведено на рис. 2. Твердість металу шва після гартування (крива 2) не змінюється, проте твердість основного металу знижується до рівня твердості металу шва ($HV = 1000 \text{ МПа}$). Під час старіння відбувається перерозподіл елементів у сплаві з утворенням тетрагональної γ -фази і можливого утворення α -твердого розчину з складною кубічною решіткою. При цьому твердість металу шва і ЗТВ складатиме 1500 МПа (крива 3). Старіння зварного з'єднання при температурі $450 \text{ }^\circ\text{C}$ протягом 2 годин, яке здійснено одразу після зварювання ще більше підвищує твердість металу шва ($HV = 1550 \text{ МПа}$) і твердість основного металу ($HV = 2000 \text{ МПа}$). Саме цей режим слід рекомендувати для практичного втілення.

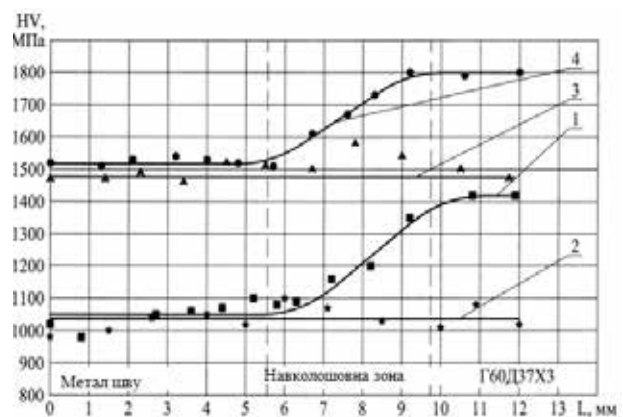


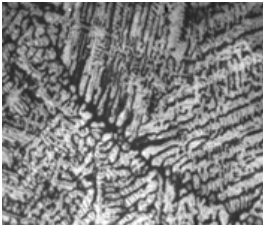
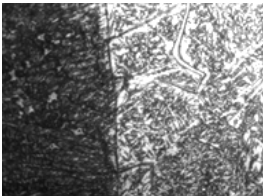
Рис. 1. Розподіл твердості у поперечному напрямку мікрошліфа зварного з'єднання зразків зі сплавом Г60Д37Х3/Г60Д37Х3 після різних видів термічної обробки: 1 – після зварювання; 2 – після гартування при $t = 800 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\tau = 15 \text{ хв}$); 3 – після гартування при $t = 800 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\tau = 15 \text{ хв}$) і старіння при $t = 450 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\tau = 2 \text{ год}$); 4 – після зварювання та старіння при $t = 450 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\tau = 2 \text{ год}$)

Одержані результати досліджень покладені в основу формування аргондуговим зварюванням біметалевого з'єднання Г60Д37Х3/Ст3.

Дослідження зварних з'єднань Г60Д37Х3/Ст3.

З метою економії дефіцитного марганцево-мідного сплаву доцільно застосовувати біметалеві зварні з'єднання з конструкційною сталлю. При виборі матеріалу перевага надається низьковуглецевій сталі Ст3. Якісна оцінка зварюваності різнорідних сплавів виконана на основі аналізу діаграм стану Fe–Mn і Fe–Cu. Мікрофотографії металу шва і ЗТВ і особливості структури зварного з'єднання Г60Д37Х3/Ст3 наведено у табл. 3. Металографічний аналіз показав відсутність тріщин та інших дефектів у зварному з'єднанні.

Таблиця 3. Результати досліджень мікроструктури зварних з'єднань Г60Д37Х3/Ст3

Мікрофотографія зварного з'єднання	Особливості структури
<i>Метал шва</i>	
 Оптична мікрофотографія металу шва × 330	Структура металу шва є двофазною і має дендритну будову. За результатами МРСА приблизний хімічний склад з урахуванням випаровування Mn: 41 % Mn; 30 % Cu; 29 % Fe
<i>Зона термічного впливу</i>	
 Оптична мікрофотографія зони термічного впливу, × 330	ЗТВ з боку сталі має ферито-перлітну структуру; поблизу границі сплавлення спостерігається наявність ділянок, на яких відбувалося проникнення марганцево-мідного сплаву по границях колишніх аустенітних зерен

Джерело: складено авторами

Рисунок 2 наочно демонструє розподіл твердості у поперечному напрямку мікрошліфа зварного з'єднання Г60Д37Х3/Ст3, яке зазнало гартування при температурі 800 °С (крива 2), старіння при температурі 450 °С протягом 2 годин (крива 3) та гартування з наступним старінням (крива 4). В результаті гартування сталь набуває мартенситної структури, спостерігається дифузія вуглецю у метал шва.

Старіння зварного з'єднання безпосередньо після зварювання підвищує твердість металу шва $\approx$ на 100 МПа і у порівнянні зі значеннями, отриманими після зварювання, сприятиме зниженню твердості у сталі та у зоні термічного впливу. Старіння після гартування також підвищує твердість металу шва, але значення твердості зони термічного впливу і основного металу знижуються до 2300 МПа.

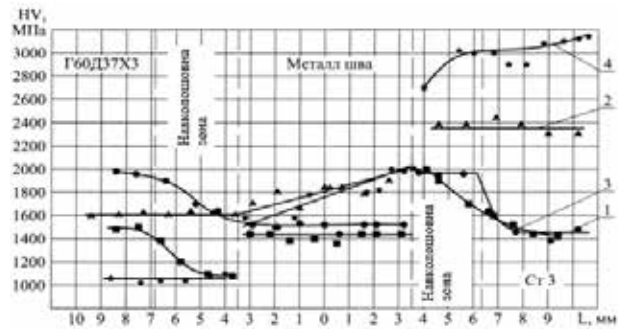


Рис. 2. Розподіл твердості у поперечному напрямку мікрошліфа зварного з'єднання Г60Д37Х3/Ст3: 1 – після зварювання; 2 – після гартування при $t = 800$ °С; 3 – після зварювання і старіння при $t = 450$ °С ($\tau = 2$ год); 4 – після гартування при $t = 800$ °С і старіння при $t = 450$ °С ($\tau = 2$ год)

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Результати досліджень показали задовільну зварюваність аргонодуговим зварюванням зразків сплаву марки Г60Д37Х3 як між собою, так і при формуванні біметалевого з'єднання з вуглецевою сталлю марки Ст3. Узагальнення отриманої інформації наведено у табл. 4 у вигляді практичних рекомендацій.

Рекомендації щодо характеристик джерел живлення. Джерела живлення для аргонодугового зварювання, як відомо, мають крутоспадаючі зовнішні характеристики, що добре узгоджується з характеристикою електричної дуги на горизонтальній ділянці з точки зору стабільності зварювальних процесів. Забезпечення бажаних характеристик зварювальних джерел живлення може досягатися за допомогою систем управління і за допомогою природніх зовнішніх характеристик в силових схемах перетворювачів електроенергії, що входять до складів зварювальних джерел живлення. Чим ближче природні зовнішні характеристики перетворювача до бажаної характеристики зварювального джерела живлення, тим простіше здійснювати управління зварювальними процесами і в результаті наблизитися до оптимальних показників якості зварного з'єднання. Бажана характеристика зварювального джерела живлення може бути відтворена як природня зовнішня характеристика резонансного перетворювача, зокрема з послідовним або з послідовно-паралельним резонансним контуром [10, pp. 1–6]. В координатах «вихідний струм – вихідна напруга» бажана зовнішня характеристика має монотонний падаючий характер з максимумом напруги на нулі струму і максимумом струму в нулі напруги. Складається умовно з трьох ділянок – перша падаюча ділянка починається зверху від напруги холостого ходу і доходить до початку околиці зварювального процесу, друга ділянка власне є околицею зварювального процесу, і третя вертикальна ділянка проходить вниз до нуля напруги на рівні струму

Таблиця 4. Практичні рекомендації щодо забезпечення якості зварних з'єднань

Технічні заходи	Рекомендації
Застосування термічної обробки для зварного з'єднання Г60Д37Х3/Г60Д37Х3	Рекомендується після зварювання застосовувати операцію старіння при температурі 450 °С протягом 2 годин, що забезпечить необхідну міцність і демпфірувальні властивості зварних з'єднань
Застосування термічної обробки для зварного з'єднання Г60Д37Х3/Ст3	
Захист зварного шва від дії кисню	Через високу активність Mn під час зварювання необхідно обов'язково захищати зварний шов від дії кисню повітря
Забезпечення бажаних характеристик джерел живлення зварювальної електричної дуги	1. Стабілізація зварювального струму при нестабільній первинній напрузі живлення. 2. Забезпечення падаючої форми зовнішньої характеристики джерела живлення зі стабілізацією потужності процесу і більшою крутизною, ніж крутизна характеристики електричної дуги в околиці перетину характеристик. 3. Завдання початкових вихідних параметрів джерела живлення та автоналаштування характеристики джерела живлення в процесі зварювання за певними критеріями якості зварювання.

Джерело: складено авторами

короткого замикання. Перша ділянка характеристики має вплив на підпал дуги та на її стабільність при великих відхиленнях робочої точки за межі околиці зварювального процесу. Друга ділянка характеристики має вплив на показники зварювального процесу. Протяжність другої ділянки (околиці зварювального процесу) залежить від траєкторії зварювання та режиму живлення зварювальної дуги. Наприклад, при зварюванні на постійному струмі околиця зварювального процесу імовірно буде меншою, ніж при зварюванні пульсуючими струмами [11]. Форма другої ділянки характеристики відповідає постійній потужності (гіперболі). Третя вертикальна ділянка характеристики обмежена струмом короткого замикання. При скороченні довжини дуги і зниженні напруги пропорційно зменшується потужність зварювального процесу, що сприяє збереженню тонких заготовок від пропалювання. Слід зауважити, що задача реалізації бажаних природніх зовнішніх характеристик зварювальних джерел живлення не завжди має раціональне технічне вирішення, оскільки силова схема перетворювача в такому разі має припускати налаштування параметрів силових компонентів для тих чи інших параметрів зварювання. Тому на практиці реалізується так звана максимальна природня зовнішня характеристика перетворювача, яка охоплює можливі бажані зовнішні характеристики. В процесі роботи можливі зовнішні характеристики реалізуються за допомогою систем управління резонансних перетворювачів.

Наукова новизна отриманих результатів: отримано подальший розвиток наукові уявлення про зварюваність марганцево-мідних сплавів аргонодуговим зварюванням.

Практична цінність роботи полягає у розроблених рекомендаціях щодо підвищення якості зварних з'єднань Г60Д37Х3/Г60Д37Х3 і Г60Д37Х3/Ст3.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з дослідженнями спроможності зварних з'єднань працювати в умовах агресивних середовищ і термоциклічних навантажень.

ВИСНОВКИ

Експериментальні роботи полягали у отриманні пробних зразків зварних з'єднань Г60Д37Х3/Г60Д37Х3 і Г60Д37Х3/Ст3, мікроструктурних дослідженнях і вимірюваннях мікротвердості металу шва і у зоні термічного впливу. Отримано зразки аргонодуговим зварюванням вольфрамовим електродом без присадки.

Встановлено вплив термічних циклів зварювання та термічної обробки на структуру і твердість металу шва і зони термічного впливу зразків зварних з'єднань Г60Д37Х3/Г60Д37Х3 і Г60Д37Х3/Ст3. Рекомендовано після зварювання застосовувати старіння при температурі 450 °С протягом 2 годин.

Розроблено рекомендації щодо забезпечення бажаних характеристик джерел живлення при аргонодуговому зварюванні.

REFERENCES

- [1] Koval Yu. M. (2005). *Splavy z efektom pamiaty formy – potuzhnyi klas funktsionalnykh materialiv* [Shape memory alloys are a powerful class of functional materials]. Nauka ta innovatsii. № 2. S. 80–95 [in Ukrainian]
- [2] Romaniuk V. T. (2023). *Prystroji na osnovi splaviv z efektom pamiaty formy dlia pidvyshchennia nadiinosti rozbirnykh elektrychnykh kontaktykh ziednan* [Alloy-based devices with shape memory effect to improve the reliability of collapsible electrical contact connections]. Naukovi pratsi NUKhT. Tom 29. № 1. S. 85–96 [in Ukrainian]
- [3] Kozlenko O. O. (1998). *Udoskonalennia zasobiv tekhnologichnoho osnashchennia na osnovi materialiv na osnovi materialiv z efektom pamiaty formy* [Improvement of Materials-Based Technological Equipment on the Basis of Form Memory]

- Materials*] : dys. kand. tekhn. nauk 05.08.04. Ukrainskii derzhavnyi morskii tekhnichnyi universytet. Mykolaiv. 155 s. [in Ukrainian]
- [4] Bykiv N. Z. & Yasnii V. P. (2022). *Zastosuvannia splaviv z pamiattiu formy u budivelnykh konstrukttsiakh [Application of Shape Memory Alloys in Building Structures]*. Suchasni tekhnologii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi. Vyp. 17. S. 4–14 [in Ukrainian]
 - [5] Firstov H. S. (2018). *Funktsionalni materialy z pamiattiu formy: suchasnyi stan i perspektyvy vykorystannia [Functional materials with shape memory: current state and prospects of use]*. Visn. NAN Ukrainy. № 6. S. 19–34 [in Ukrainian]
 - [6] Kazymyrenko Yu. O. & Lebedeva N. Yu., Makrukha T. O. (2023). *Increasing the Damping Capability of Titanium Alloys by Deposition of Plasma Coatings Made from Titanium Nickelide*. Metallophysics and Advanced Technologies. Vol. 45 № 4. P. 457–467 [in Ukrainian]
 - [7] Lebedeva N. Yu. (2005). *Vplyv termichnoi obrobky na fizyko-mekhanichni vlastyvoli vysokodemfirovalnykh marhantsevo-midnykh splaviv [Effect of Heat Treatment on the Physical and Mechanical Properties of High-Damping Manganese-Copper Alloys]*: dys. kand. tekhn. nauk 05.16.01. Zaporizkii natsionalnyi tekhnichnyi un-t. Zaporizhzhia. 155 s. [in Ukrainian]
 - [8] Lebediev V. O. & Maksymov S. Yu., Brykov M. M., Makarenko N. O., Zhuk H. V., Loi S. V. (2024). *Innovatsiina tekhnika i tekhnologii dlia elektroduhovoho zvariuvannia ta naplavlennia [Innovative techniques and technologies for electric arc welding and surfacing]*: monohrafiia. Chernyiv : NU “Chernyivska politekhnika”. 262 s. [in Ukrainian]
 - [9] Kutsova V. Z. & Kovzel M. A., Nosko O. A. (2008). *Lehovani stali ta splavy z osoblyvymy vlastyvostiamy [Alloy steels and alloys with special properties]*: pidruchnyk. Dnipropetrovsk : NMetAU. 348 s. [in Ukrainian]
 - [10] Pavlov G. & Obrubov A., Vinnychenko I., A. Kazariezov A. (2024). *Properties of Resonant Converter as Controlled Object With Amplitude, Frequency and Pulse-Width Methods of Output Voltage Regulation*. IEEE 5th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). Kharkiv. Pp. 1–6 [in Ukrainian]
 - [11] Rosario Casanueva & Christian Brañas, F. Javier Diaz, Francisco J. Azcondo, Diego Ferreño, Jesus Setien (2023). *Characterization of an energy efficient pulsed current TIG welding process on AISI 316 and 304 stainless steels*. Heliyon. Volume 9. Issue 9. e19819

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Коваль Ю. М. (2005). Сплави з ефектом пам'яті форми – потужний клас функціональних матеріалів. *Наука та інновації*. № 2. С. 80–95.
- [2] Романюк В. Т. (2023). Пристрої на основі сплавів з ефектом пам'яті форми для підвищення надійності розбірних електричних контактних з'єднань. *Наукові праці НУХТ*. Том 29. № 1. С. 85–96.
- [3] Козленко О. О. (1998). Удосконалення засобів технологічного оснащення на основі матеріалів на основі матеріалів з ефектом пам'яті форми : дис. канд. техн. наук 05.08.04. Український державний морський технічний університет. Миколаїв. 155 с.
- [4] Биків Н. З. & Ясний В. П. (2022). Застосування сплавів з пам'яттю форми у будівельних конструкціях. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. Вип. 17. С. 4–14.
- [5] Фірстов Г. С. (2018). Функціональні матеріали з пам'яттю форми: сучасний стан і перспективи використання. *Вісн. НАН України*. № 6. С. 19–34.
- [6] Kazymyrenko Yu. O. & Lebedeva N. Yu., Makrukha T. O. (2023). *Increasing the Damping Capability of Titanium Alloys by Deposition of Plasma Coatings Made from Titanium Nickelide*. *Metallophysics and Advanced Technologies*. Vol. 45 № 4. P. 457–467.
- [7] Лебедева Н. Ю. (2005). Вплив термічної обробки на фізико-механічні властивості високодемфірувальних марганцево-мідних сплавів : дис. канд. техн. наук 05.16.01. Запорізький національний технічний ун-т. Запоріжжя. 155 с.
- [8] Лебедєв В. О. & Максимов С. Ю., Бриков М. М., Макаренко Н. О., Жук Г. В., Лой С. В. (2024). *Інноваційна техніка і технології для електродугового зварювання та наплавлення : монографія*. Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка». 262 с.
- [9] Куцова В. З. & Ковзель М. А., Носко О. А. (2008). *Леговані сталі та сплави з особливими властивостями : підручник*. Дніпропетровськ : НМетАУ. 348 с.
- [10] Pavlov G. & Obrubov A., Vinnychenko I., A. Kazariezov A. (2024). *Properties of Resonant Converter as Controlled Object With Amplitude, Frequency and Pulse-Width Methods of Output Voltage Regulation*. IEEE 5th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). Kharkiv. Pp. 1-6.
- [11] Rosario Casanueva & Christian Brañas, F. Javier Diaz, Francisco J. Azcondo, Diego Ferreño, Jesus Setien (2023). *Characterization of an energy efficient pulsed current TIG welding process on AISI 316 and 304 stainless steels*. Heliyon. Volume 9. Issue 9. e19819

© Лебедева Н. Ю., Казимиренко Ю. О., Обрубов А. В.
 Дата надходження статті до редакції: 12.05.2025
 Дата затвердження статті до друку: 26.05.2025