

Секція 3

ВИКОРИСТАННЯ ВІБРАЦІЇ В ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ

УДК 621.791.763

В.І. БІЛОБОРОДЧЕНКО

Національний університет “Львівська політехніка”

ВІБРАЦІЙНА СТАБІЛІЗАЦІЯ ПОЧАТКОВОГО КОНТАКТНОГО ОПОРУ ПРИ КОНДЕНСАТОРНОМУ ЗВАРЮВАННІ ТЕРМОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ НА БАЗІ ВОЛЬФРАМ-РЕНІЄВИХ СПЛАВІВ

© Білобородченко В.І., 2011

Наведено результати дослідження впливу вібраційних механічних коливань, прикладених до зони електрод-електрод контактної зварювальної машини, на стабілізацію початкового електричного контактного опору термогілок з вольфрам-ренієвих сплавів при формуванні зварної робочої точки (спаю) термопар.

The paper presents results of research on the impact of vibrating mechanical vibrations applied to the electrode area contact welding machine to stabilize the initial electrical contact resistance of tungsten- rhenium thermobranches alloys welded in the formation of a working point (junction) thermocouple.

Постановка проблеми. Достовірність інформації про перебіг процесів у високоенергетичних середовищах (розплави металів, високотемпературні газові потоки) забезпечується датчиками, 15 % яких є вимірювачами температури. Найпоширеніші контактні перетворювачі – термопари (48...55 %). Перспективним напрямом у зростанні їхніх функціональних можливостей (імовірність безвідмовної роботи $R(t_1, t_2) = 0,96$, основна похибка вимірювань $\delta = 0,4$ %, робочий діапазон вимірювань 1800...3000 °C) є використання гілок термопар з вольфрам-ренієвих сплавів діаметром 30...200 мкм [1].

Проте надійність таких термопар, оцінена через інтенсивність відмови їхнього робочого контакту, становить $\lambda(t_1, t_2) = 0,55 \cdot 10^{-2} 1/\text{год}$ через чутливість матеріалів до технологічного оброблення та виконання контакту у вигляді механічного з'єднання. Найкращі показники експлуатаційної надійності мають термопари зі зварним з'єднанням термоелектродів, яке, за оцінним значенням термоструму, утворює постійно замкнену релейну термоконтактну групу [1].

Найприйнятнішим технологічним прийомом виготовлення такої групи є контактне точкове мікрозварювання на базі конденсаторних дозаторів енергії, переваги яких такі: питома енергія формування з'єднання 1,78 Дж/мм², приведений об'єм зварної точки $1,56 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3$, швидкості нагрівання та охолодження $170...860 \cdot 10^3 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$, $1 \cdot 10^4...1 \cdot 10^5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$, постійність дозування енергії і висока відтворюваність параметрів режиму, час зварювання 1...20 мс. Це дає змогу мінімізувати та локалізувати негативний вплив термодформацийного циклу зварювання на фізико-механічні та структурні складові тугоплавких матеріалів [1].

Вищевикладені переваги сповна реалізуються лише за строгих, відтворюваних параметрів міжелектродної зони дозатора енергії, які, зрештою, за однакових умов, оцінюються величиною початкового гальванічного контактного опору R_0 . зі зростанням ролі масштабного фактора, складності геометрії початкового контакту гілок, високої підготовки їх поверхні (хвилястість $H_x = 26...60$ мкм, довжина $L_x = 1700...3000$ мкм), зменшенням зусилля стискування електродів P_e машини для запобігання надмірній деформації вплив R_0 починає переважати (40...60 % загального опору) [2].

Аналіз досліджень з питання стабілізації початкового контактного опору. Розкид значень R_0 у межах технологічно доцільних зусиль стискування електродів $P_e = 1...10$ ДаН змінюється в 200...5000 разів, а для заданого P_e стандартне відхилення від математичного сподівання становить 150...400 % [2]. Неможливість утримання R_0 на стабільному заданому рівні вимагає додаткових операцій, несумісних у часі з формуванням зони зварювання, спрямованих на стабілізацію показників початкового опору, як основної запоруки, за решти однакових умов, надійності робочого контакту термодари: механічна обробка контактних поверхонь, використання проміжних матеріалів, хімічне утворення плівок з гарантованими властивостями, термообробка поверхні контактних пар до певної міри стабілізують опір [3].

Найдоступнішим є підвищення зусилля стискування. У діапазоні $P_e = 1...5$ даН опір зменшується в 2...4 рази з інтенсивністю, пропорційною до розвитку площин контактування. У разі їх геометричної стабілізації градієнт зміни R_0 спадає. Обмеженням на застосування підвищених P_e є складність форми виробів, втрата стійкості електродів, залишкові локальні поля напружень [4].

Перспективним є накладення нормальних коливань частот зварювального струму та ультразвуку [5]. Позитивний вплив останнього на статичну міцність з'єднань пов'язаний зі зменшенням та стабілізацією перехідного опору через вирівнювання рельєфу (вдвічі) й утворенням ювенільної поверхні з центрами схоплювання. Ефект обмежений величиною P_e , швидкістю окиснення активованої поверхні, накопиченням продуктів руйнування рельєфу. Стабільні характеристики опору зберігаються до 10 год. Технологія складна та обмежена: необхідність застосування захисних середовищ на стадії руйнування плівки та активації поверхні, забезпечення стабільного акустичного опору та резонансу для деталей розвиненої конфігурації, складність обладнання.

Використання проміжних матеріалів у поділі [6] дає змогу формувати поверхні певної чистоти, вільні від продуктів окиснення, знизити поверхневе тертя у поділі, концентрувати теплогенерацію у контакті без виплеску під час зварювання. Пластичні прокладки підвищують і стабілізують початковий контактний опір, проте плакування нікелем або алюмінієм має зворотний ефект. Через теплофізичні характеристики прокладок і плакувальних матеріалів застосовувати їх для виробів високотемпературної термометрії неможливо.

Рекомендації з хімічної підготовки поверхонь [2] суперечливі. Знежирення з подальшим травленням утворює однорідні крихкі плівки, проте не має переваг над механічними способами. Неможливість виведення жирових плівок, менших за 5 \AA , узалежнює міцність з'єднання від коливання їхньої товщини, хоча стабільність результатів зварювання зростає в 2,5 рази. Недосконалістю хімічних методів є наявність слідів адгезійних хлоридних плівок та йонів сильних мінеральних кислот. Найкращі результати спостерігаються під час утворення тонких пасивувальних плівок [5]. Проте при технологічних зусиллях зварювання $P_e < 5$ даН ці способи не гарантують звужування смуги розкиду значень контактного перехідного опору за терміну зберігання оброблених деталей 10 діб. Не виключається вплив обробки на метрологічну надійність виробу, а також виникають труднощі технологічного плану під час знежирення термодротів малих діаметрів.

Термічна обробка можлива двома способами: а) нагрівання в вакуумі або відновлювальних середовищах, б) пропускання підігрівного імпульсу струму окремо або в циклі зварювання [2]. В першому випадку плівки повністю не виводяться, сліди вологи сприяють утворенню оксидів.

Рекомендації щодо підігрівного імпульсу суперечливі. В роботі [2] стверджується, що стабільні результати зварювання гарантуються низьким постійним опором, який має мінімальний розкид за незначних (без підігріву) температур початку процесу. Проте в роботі [3] наголошується, що єдиним раціональним заходом стабілізації характеристик контактної дії є попереднє пропускання підігрівного імпульсу струму (30...80 % амплітуди зварювального). Підігрівання сприяє вирівнюванню рельєфу, руйнації плівок, стабілізує геометрію та теплогенерацію контактної зони, зменшує густину струму в мікроступах, запобігає утворенню виплеску на жорстких деталях складної форми. Оптимум дії підігріву (спад медіанного сподівання величини початкового контактної опору в межах смуги розкиду $\pm 10\%$) становить 1,5...3 мс; досягнення повного мінімуму розкиду показників перехідного опору – 20...35 мс. Останнє значно обмежує застосування підігріву під час зварювання тугоплавких термогальванічних матеріалів.

Мета доповіді. Промислово освоєні способи стабілізації величини R_0 на заданому рівні з певним гарантованим розкидом значень через особливості масогабаритних показників термогальванічних матеріалів та геометрії їх складання під зварювання, несумісність у часі з циклом формування зварної точки, негативний вплив на фізико-механічні та структурні показники зварюваних матеріалів не дають змоги досягти гарантованих результатів, що вимагає здійснення досліджень з нестандартних прийомів стабілізації початкового опору в заданих межах.

Виклад основного матеріалу. За основу підходу прийнято такі міркування – незначна товщина плівки на сплавах вольфраму не сприяє утворенню внутрішніх напружень, достатніх для її саморуйнування, проте об'ємне відношення ($\psi=3.35$) вказує на можливість конгломератного відшаровування за значних кутів сходження бокової поверхні конусів мікрорельєфу при силовому навантаженні [7]. Прикладання зусилля стискання P_e утворює силу тертя спокою ($0.25 P_e$ [5]), достатню для зміни стану провідності контакту термодротів. Прикладання зсувного зусилля позитивно впливає на встановлення рівня провідності, характерного для таких умов тертя. Для практичної реалізації вищевикладеного [8] створено стендову вібраційну систему (рис. 1) на основі генераторного блока прямокутних імпульсів (м/с КР1600ВИ1) з транзисторним підсиленням, просічністю 2 і частотою 50...500 Гц, блока стабілізатора силової напруги (0...200В), електро-механічного вібратора, що утворює рухоми контактну пару з нижнім електродом зварювальної установки.

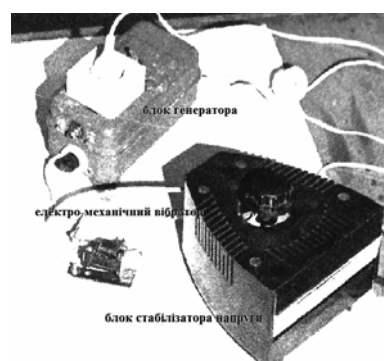


Рис. 1. Система вібраційна блочна

Вплив встановлювальних параметрів вібратора та віброграми нижнього електрода зварювальної установки (строга прямокутність імпульсів, спотворена інерцією та жорсткістю зварювального контуру) відображено на рис. 2, 3.

Різноманітність процесів у контакті за наявності зсувних деформацій оцінено через контактну провідність σ_c , тангенційне зміщення X_1 та умову макроскопічного ковзання τ_1 / p_c [7]

$$s_i = s_0 \sqrt{1 + a \left(\frac{F_m}{P_e} \right)^2}, \tag{1}$$

$$x_i = \frac{3(2-n)}{8Ga} m_0 P_e \left[1 - \left(\frac{F_m}{m_0 P} \right)^{3/2} \right], \tag{2}$$

$$m_0 = t_i \left(\frac{1}{3 p_c \sqrt{K_t^{-2} - 1}} \right); K_t = t_i / t_0 \tag{3}$$

де σ_0 – початкова контактна провідність, 1/Ом; α – коефіцієнт пропорційності (з урахуванням зміцнення підповерхневих шарів контактного матеріалу $a = 12$ [7]); F_m – змінна складова електромагнітної сили вібратора, даН; ν – коефіцієнт Пуассона; G – модуль зсуву, МПа; a – радіус позірної площинки контактування, м; p_c – середній тиск у контакті, Па; t_i, t_0 – міцність зрізу плівки та основного металу; μ_0 – коефіцієнт тертя.

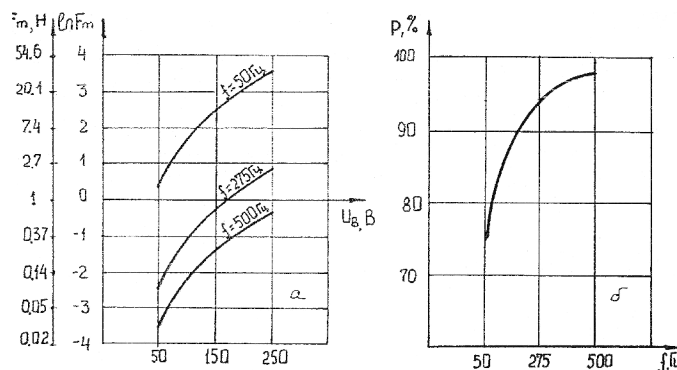


Рис. 2. Вплив установлювальних параметрів вібраційної системи (напруга U_b [В]), частота збудження f_b , [Гц] на амплітуду змінної складової (а) та пульсації $P\%$ (б) електромагнітної сили F_m [Н]

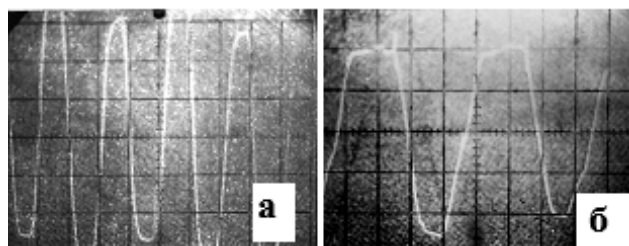


Рис. 3. Віброграми реакції зони електрод – електрод зварювальної установки на дію електромеханічного вібратора: а – $f_b = 200$ Гц; б – $f_b = 100$ Гц

Показники тертя, приведені до умови критичної пластичності [7], узагальнені через значення коефіцієнта тертя μ_0 як відгуку на зміну топології контакту

$$m_0 = \left(\frac{1}{a} \right) \sqrt{\left(\frac{R_0}{R_i} \right)^2 - 1}, \tag{4}$$

де R_0/R_i – значення електричних опорів за зусилля стискання відповідно P_{emin} та P_{ei} .

У разі одночасної дії F_m та P_e реалізуються два варіанти фрикційної взаємодії контактних матеріалів (табл.1): $F_m / P_e > \mu_0$ – тертя ковзання з макропереміщенням, за якого через малі швидкості зміщення ($f_b \rightarrow \min$) ініціюється руйнування плівок та вирівнювання рельєфу з розвитком

у площинах витирання плям провідності; $F_m / P_e < \mu_0$ – тертя спокою з формуванням плям провідності на пластично здеформованих верхівках рельєфу і розтрощених на них плівках.

Таблиця 1

Умови фрикційної взаємодії у контактному поділі

Рівень встановлювального параметра			Оцінки тертя		Тип тертя
U_e , В	P_e , даН	f_b , Гц	F_m / P_e	μ_0	
50	0.2	28	0.65	0.266	ковзання
50	4.0	500	0.031	2.85	спокою
150	2.1	264	0.42	0.295	ковзання
150	2.1	500	0.61	1.12	спокою

Для зусилля стискання $P_e=2^{+0.1}$ даН напрям вектору результуючого напруження тіла мікроступу орієнтовано нормально до площини контактування, що за великих кутів поверхонь конусів нерівностей сприяє розвитку контурної площі A_k [7]. Прикладання зсуву посилює процес за рахунок пластичної течії мікрорельєфу; значного руйнування плівок може не спостерігатися через ефект проковзування та значного зростання $A_k \rightarrow A_n$ – площин порівняно з ефективною площею контактування A_e . Тому зростання P_e за незмінних параметрів віброполя приводить до більших значень R_b порівняно з R_{on} , R_{ok} , оскільки провідність пропорційна до квадрата позірної площі A_n [7]. Тут R_{on} , R_{ok} – відповідно початковий контактний опір до вібраційного впливу на контакт та кінцеве його значення після припинення дії вібрації. Якщо $P_e = 4$ даН, зміщення X_i становить $7.3 \cdot 10^{-7}m$, середній тиск $p_c = 6.614 \cdot 10^9$ Па ($a = 0.71 \cdot 10^{-5} m^2$, $F_m = 0,83$ даН). Для такого граничного, в плані експерименту, стану умова просковзування по плівках у поділі має вигляд [7]

$$t_i = \frac{P_c}{\sqrt{[3(K_t^{-0.5} - 1)]^{-1}}} = 1.851 \cdot 10^{10} \text{ Па} \geq t_0 = [HB / (2...3)] = 1.2...1.7 \text{ МПа}. \tag{5}$$

Тобто за умов, близьких до тертя спокою (параметри вібратора дорівнюють середнім у плані експерименту значень), спостерігається ефект руйнування зчеплених плям провідності (рис. 4, а).

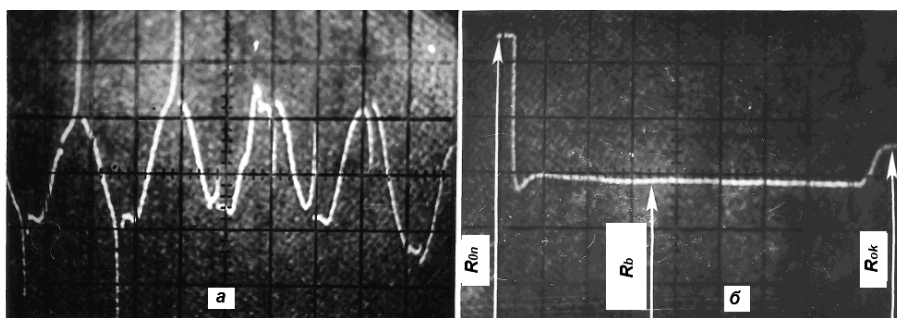


Рис. 4. Осцилограми вібраційного формування контактної пари термогілок ВР/ВР20 (оцінка за величиною контактної опору): а – діаметр термогілок $d= 200$ мкм, кут перехрещення $\alpha= 90^0$, $P_e= 2,1$ даН, $f_b= 250$ Гц, $U_e =150$ В; б – діаметр термогілок $d= 100$ мкм, кут перехрещення $\alpha= 90^0$, $P_e= 1^{+0.1}$ даН, $f_b= 500$ Гц, $U_e =250$ В. $R_{on} = 1270$ мкОм, $R_{ok} = 700$ мкОм, $R_b= 640$ мкОм

Припинення у такому разі вібраційної дії супроводжується підвищенням окисненням по площинках зрізу, що підтверджується більшими кінцевими значеннями R_{ok} . За P_e , що відповідають інтервалу точності його задавання, фрикційні показники становлять: $X_i= 1.29 \cdot 10^{-8} m$, $p_c = 1.33 \cdot 10^{11}$ Па,

$\tau_f=1.2 \cdot 10^9 \text{ Па}$, $K_f=0.09$, що відповідає наявності слабкої за міцністю поверхні з добрим граничним змоцненням [7]. Отже, процеси зрізу зон зчеплення обмежені, зменшення величини R_b досягається, головню, за рахунок пластичної течії мікронерівностей та витирання плівок (рис. 4, б). Останнє супроводжується накопиченням продуктів зношення, які володіють високою твердістю та за малих переміщень ($f_b \rightarrow \max$) практично залишаються в поділі. Збільшення f_b призводить до зростання швидкості зміщення по плівках та проковзування через зниження ефективності прояву F_m , час встановлення бажаного стабілізованого рівня опору зростає.

Напруга збудження U_e (діапазон 150...250 В) мінімізує час встановлення бажаної величини R_{ok} , що дає змогу виконувати зварювання безпосередньо у віброполі. Позитивний вплив напруги пов'язаний зі зростанням F_m ($F_{m \max}=4.72 \text{ даН}$).

Зростання P_e послаблює прискорене накопичення продуктів витирання за рахунок диспергування та часткового проникнення у поверхню контактних матеріалів з одночасним вирівнюванням твердості [7].

Отримані результати використано під час виготовлення зварних робочих контактів (спаїв) термоперетворювачів типу ТВР-2085 (рис. 5) та випробовувано відповідно до [9]. Розбудовані полігони частотностей відмови таких контактів (рис. 6), виготовлених за конструктивними рішеннями [10, 11], демонструють, що наявність вібраційного навантаження для стабілізації початкових умов контактування термогілок та зварювання спаю у прикладеному вібраційному полі за наявності технологічно доцільного зусилля стискання електродів підвищує клас надійності виробу в середньому у 1,5 раза навіть в неоптимізованих режимах роботи вібросистеми. Останнє об'єктивно підтверджується зростанням частоти руйнування виробу по основному металу та розкриття дефектів, характерних для термогілок з тугоплавких термочувливих металів та сплавів (рис. 7).

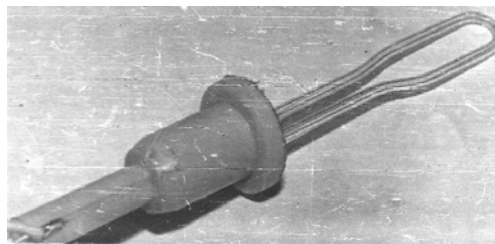


Рис. 5. Термоперетворювач типу ТВР-2085 (робочий зварний контакт термомари, сформованої з термогілок ВР5/ВР20 діаметром 100 мкм розміщений у кварцовому чохлі)

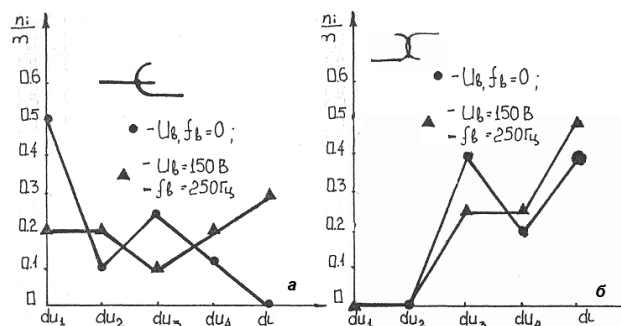


Рис. 6. Полігон частотностей відмови зварного робочого контакту термоперетворювача ТВР-2085, виконаного за конструктивними рішеннями: а – [10]; б – [11] та за стандартною технологією -● і у прикладеному вібраційному полі -▲

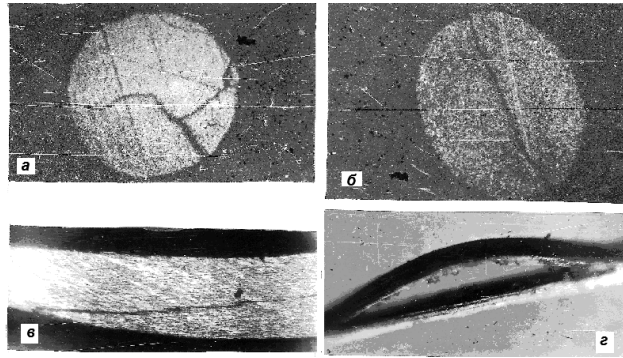


Рис. 7. Дефектність термоголок термоперетворювача TBP-2085 ($\times 100 \dots 200$): а – BP5, б – BP-20 – тріщини після нормалізації термоелектрорушійної сили E ; в – BP5, г – BP20 – тріщини та розширення під час виконання конструктивної петлі (радіус згину понад $10d$; $d = 100 \dots 200$ мкм)

Висновки: 1. Прикладення тангенційного зусилля, створеного за допомогою вібраційного навантаження, орієнтованого нормально до осі електродів зварювальної установки, створює умови відтворення на заданому рівні величини контактної провідності, яка оцінюється за значенням електричного контактного опору зони електрод-електрод.

2. Характер фрикційних процесів у зоні електрод-електрод залежить від співвідношення сил: електромагнітної F_m , що діє нормально до осі електродів та їх зусилля стискання P_e : а) тертя ковзання з макропереміщенням, за якого ініціюється руйнування плівок та вирівнювання рельєфу з розвитком у площинах витирання плям провідності; б) тертя спокою з формуванням плям провідності на пластично zdeформованих верхівках рельєфу і розтрощених на них плівках.

3. Доцільний технологічний час стабілізації опору на заданому рівні визначається переважним впливом напруги збудження вібратора U_e у діапазоні 150...200В та частоти вібрації f_b не більше за 50...250 Гц за заданого значення зусилля стискання електродів P_e . Подібність значень електричних опорів $R_{ок}$ після припинення дії вібрації та у процесі її дії R_b дає змогу виконувати зварювання робочих спаїв термопар у прикладеному вібраційному полі, що підвищує клас надійності виробу не менш як у 1,5 раза.

1. Куритнык И.П., Белобородченко В.И., Большаков М.В. *Современные технологии для изготовления термопар / ТС.6. "Приборы и устройства для контроля и регулирования технологических процессов"*. – М.: Информприбор, 1990. – № 3. – 40 с. 2. Ворона Д.С., Фортунатова Н.Н., Касаткин О.Г. *О величине сопротивления контакта при точечной микросварке // Автомат. сварка.* – 1973. – № 2. – С. 27–31. 3. Арский В.Н. *Контактная точечная сварка деталей в электронной промышленности.* – М.: ЦНИИ "Электроника", 1973. – № 7(95). – 73 с. 4. Бумбиерис Э.В. *Начальный контакт деталей и стабильность процесса контактной микросварки // Свароч. пр-во.* – 1993. – № 1. – С.27–29. 5. Гельман А.С. *Основы сварки давлением.* – М.: Машиностроение, 1990. – 312 с. 6. Беризиеико В.П., Мельников С.Ф. *Особенности конденсаторной сварки узлов ламп из тугоплавких металлов // Актуальные проблемы сварки цветных металлов.* – К.: Наук. думка. – 1985. – С.315–317. 7. Боуден Ф.П., Тэйбор Д. *Трение и смазка твердых тел.* – М.: Машиностроение, 1968. – 543 с. 8. *Декларацийний патент на винахід. 44977А G01к7/02, В23к 11/00. Спосіб виготовлення високотемпературної термопари / Білобородченко В.І. Д5.03.2002. Бюл. №3.* 9. Білобородченко В.І. *Механічні випробовування та обладнання для контролю якості микроварних. точкових контактних зварних з'єднань // Вісник НУЛП "Динаміка, міцність та проектування машин і приладів".* – № 509, 2004. – С.11–17. 10. Куритнык И.П., Фединец В.А., Донин В.М. *Средства для измерения температуры в металлургии / ТС.6. "Приборы и устройства для контроля и регулирования технологических процессов"* – М.: Информприбор, 1988. – № 1. – 49 с. 11. А.с. 1728677 СССР., МКИ G01K7/02. *Термопара / В.И. Белобородченко, И.П. Куритнык. Опубл. 23.04.92. Бюл. № 15.* – 2 с.