

ЗАСТОСУВАННЯ ПРИСАДКИ CuSi3 ДЛЯ З'ЄДНАННЯ ДЕТАЛЕЙ ХУДОЖНІХ ВИРОБІВ ЕЛЕКТРОДУГОВИМ TIG ЗВАРЮВАННЯМ-ПАЯННЯМ

С.М. Мінаков, Є.П. Чвертко, Н.М. Стреленко, А.С. Мінаков

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, Берестейський проспект (Перемоги), 37. E-mail: minakovsergey61@gmail.com

Статтю присвячено виготовленню художніх виробів із низьковуглецевої сталі. Через особливості конструкції таких виробів, конфігурації та взаємного розташування нероз'єднаних з'єднань та їхніх елементів застосування технологій електродугового зварювання виявляється обмеженим. Розглянуто переваги електродугового зварювання-паяння для виготовлення таких конструкцій. Наведений детальний опис вирішення технологічних задач, які постали при виготовленні реальних скульптур зі сталі, а саме: з'єднання суцільних профілів, з'єднання деталей із дроту з трубою, з'єднання пучка тонких дротів з півсферою і з'єднання дротів різних діаметрів під гострими кутами. Подано фото і характеристики скульптур, які виготовлені зі застосуванням TIG зварювання-паяння. Бібліогр. 7, табл. 1, рис. 8.

Ключові слова: художні вироби зі сталі, TIG зварювання-паяння, присадка CuSi3

Вступ. Зварювання та споріднені процеси отримання нероз'єднаних з'єднань на сьогодні успішно застосовують в багатьох галузях, зокрема при виготовленні художніх виробів. Особливостями конструкції таких виробів є наявність елементів різної товщини та різної геометричної форми, несиметричність конструкції в цілому та розташування на ній нероз'єднаних з'єднань зокрема. На додачу, місця з'єднання деталей та конфігурація з'єднань у першу чергу залежать від художнього задуму, через що вони не завжди є оптимальними і за умови використання традиційних способів електродугового зварювання на конструкції можуть виникати ділянки, які багаторазово піддаються циклам нагрівання-охолодження. У свою чергу, це призводить до погіршення механічних характеристик з'єднань і утворення несприятливих рівнів залишкових зварювальних напружень і деформацій.

Електродугове зварювання-паяння є сучасною технологією, яка широко застосовується для з'єднання тонколистового металу. Джерелом нагрівання при цьому способі виступає електрична дуга, а в якості присадного матеріалу використовують спеціальні дроти на основі міді та алюмінію. Оскільки температура плавлення таких дротів нижча за температуру плавлення сталей, то процес відбувається із нижчими у порівнянні із електродуговим зварюванням значеннями напруги та струму, що зменшує тепловий вплив на деталі та знижує розбризкування. Достатній рівень автоматизації процесів електродугового зварювання-паяння в інертних газах забезпечує хорошу контрольованість погонної енергії. Присадки з високим

Мінаков С.М. – <https://orcid.org/0000-0001-8607-4120>, Чвертко Є.П. – <https://orcid.org/0000-0003-3073-1034>, Стреленко Н.М. – <https://orcid.org/0000-0002-8571-5958>, Мінаков А.С. – <https://orcid.org/0000-0002-1724-3100>
© С.М. Мінаков, Є.П. Чвертко, Н.М. Стреленко, А.С. Мінаков, 2023

рівнем фізико-хімічної сумісності до основного матеріалу конструкції/виробу забезпечують високий рівень фізико-механічних та антикорозійних характеристик з'єднання, низький рівень залишкових напружень і деформацій тонколистових елементів конструкції [1].

Проведений ряд експериментальних досліджень електродугового зварювання-паяння методом MIG (CMT) напусткових з'єднань із низьковуглецевої сталі мідними присадками показав часткове оплавлення кромки зразків в реакційній зоні на міжфазній границі взаємодії мідної присадки і основного матеріалу [2, 3], що не є характерним для процесу паяння. Тому у разі використання мідних присадок в іноземній англійській літературі також використовують термін зварювання припоєм [4].

Оскільки для вирішення технологічних задач при виготовленні художніх зварних або паяних виробів часто необхідно рознести у часі процеси нагрівання деталей дугою та введення присадки за основу було обрано технологію електродугового зварювання-паяння неплавким електродом TIG.

Мета роботи – розробити технології електродугового зварювання-паяння методом TIG для отримання якісних нероз'єднаних з'єднань художніх виробів специфічної геометрії зі сталі.

Розробка технології електродугового зварювання-паяння методом TIG для художніх виробів. Процес складання та з'єднання нестандартних конструктивних елементів художніх виробів зі сталі потребує адаптації як оснастки для кожного виробу, так і існуючих сучасних технологій зварювання та паяння.

Застосування присадок на основі міді (CuSi3 , CuAl8) для з'єднання специфічної геометрії художніх виробів зі сталі способами електродугового паяння гарантовано забезпечує:

- високі антикорозійні характеристики отриманого шва [5];
- мінімальне вигорання наявного антикорозійного покриття в зоні термічного впливу, завдяки більш низькій у порівнянні зі сталями температурі плавлення мідних присадок ($910 \dots 1025 \text{ }^\circ\text{C}$);
- мінімальне розбризкування металу;
- контрольоване тепловкладення в основний метал;
- легку наступну обробку отриманого шва.

Найширше застосування на виробництві в різних галузях промисловості має присадка у формі дроту марки CuSi3 (ISO 24373: CuSi3Mn1 , DIN 1733: SG-CuSi3). Її застосовують для з'єднання низьколегованих, нержавіючих і сталей з антикорозійним покриттям.

Оптимізація основних фізико-хімічних властивостей мідної присадки, таких як: розтікання в розплавленому стані, змочування поверхні основного матеріалу та дифузійні процеси на границі присадка-метал досягається завдяки хімічному складу присадки (таблиця) та термічному циклу зварювання-паяння [6, 7].

З'єднання квадратного профілю. Сформувати якісне з'єднання конструктивних елементів художнього виробу із квадратного профілю $10 \times 10 \text{ мм}$ суцільного перерізу. Матеріал виробу – низьковуглецева сталь.

Деталі у з'єднаннях розташовані під різними кутами – від 15 до 90° . Застосування традиційного зварювання методами MIG, MAG та TIG призводить до витікання зварювальної ванни по сторонам від поздовжньої осі профілю. Тому застосування вказаних способів зварювання вимагає переходу на багатошарову схему з'єднання та необхідність механічного знімання наявного підсилення шва, що виникає в наслідок витікання розплаву. При розташуванні елементів виробу під гострими кутами це зробити досить складно.

Електродугове TIG зварювання-паяння із застосуванням дроту CuSi3 дозволяє заповнити зазор присадкою між крайками без значних її витікань завдяки покращеному змочуванню. Через це отримане з'єднання майже не потребує механічної обробки, а якщо вона і потрібна, то її легко виконати внаслідок меншої міцності присадки і її гарної здатності до механічної обробки.

Беручи до уваги досить велику для процесів електродугового TIG зварювання-паяння тов-

Таблиця. Хімічний склад дроту CuSi3 , мас. %

Cu	Si	Mn	Fe	Sn	Zn	Pb	Al	P
Основа	2,8...4,0	$\leq 1,5$	$\leq 0,5$	$\leq 1,0$	$\leq 1,0$	$\leq 0,02$	$< 0,01$	$< 0,02$

щину металу, перед з'єднанням суцільних профілів $10 \times 10 \text{ мм}$ на їхніх крайках на одній із граней профілю необхідно зробити скоси (рис. 1, а) та/або встановити їх із зазором $2 \dots 3 \text{ мм}$. Нагрівання дугою крайок деталей слід починати зі сторони скосів. На крайках формується тонкий прошарок розплаву. Необхідно прогріти профіль по всьому перерізу до температури вищої за температуру плавлення присадки. Нагрівання має бути рівномірним. Важливо вловити момент коли ділянка розплаву досягає максимальних розмірів – це значною мірою залежить від практичних навичок митця-зварника. На цьому етапі в зазор вводять присадку – дріт CuSi3 . Якщо в процесі підігріву ділянки розплаву на протилежних кромках зливаються в єдину область розплаву, то присадку слід подавати максимально швидко. Підігрів проводять до заповнення присадкою всього перерізу (рис. 1, б). Рівень заповнення шва присадкою супроводжується різким зниженням рівня розплавлення присадки. Отримані таким способом з'єднання наведено на рис. 2.

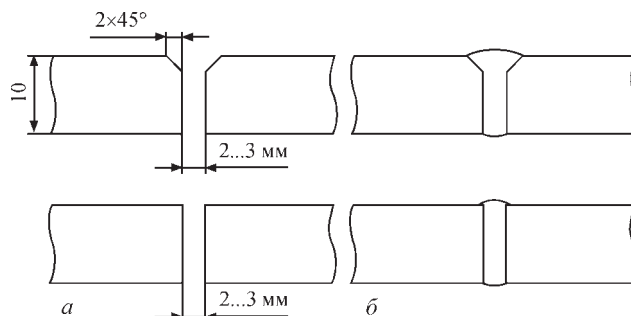


Рис. 1. З'єднання із суцільного профілю $10 \times 10 \text{ мм}$: а – підготовка крайок; б – схема з'єднання

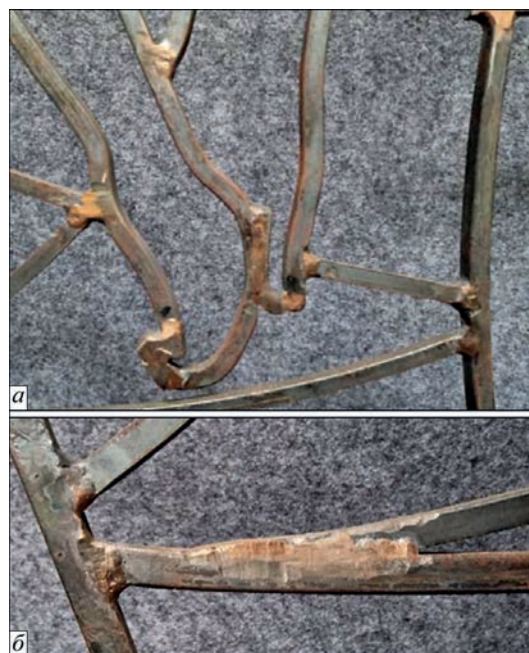


Рис. 2. Зовнішній вигляд з'єднань із суцільного профілю $10 \times 10 \text{ мм}$

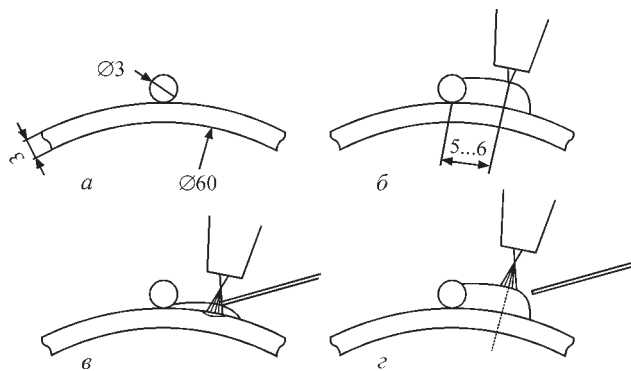


Рис. 3. З'єднання дроту з поверхнею труби: *а* – деталі перед з'єднанням; *б* – початок процесу; *в* – утворення першого шару з'єднання; *г* – утворення другого шару з'єднання

З'єднання дрiт-труба. Сформувати якісне з'єднання конструктивних елементів художнього виробу із дроту діаметром 3 мм, який розташований на поверхні труби діаметром 60 мм із товщиною стінки 3 мм. Матеріал виробу – низьковуглецева сталь.

Процес слід починати з підігрівання дугою поверхні труби на відстані 5...6 мм від бічної поверхні дроту (рис. 3). Коли з'являється ділянка рідкого металу слід подати присадку. Присадка завдяки гарному розтіканню змочує дрiт. Постійно додаючи присадку, переміщуємо пальник вздовж бічної поверхні дроту. Через приблизно 10 мм дугу і присадку можна перенести ближче до дроту. Розплавлена присадка завдяки нагріванню периферійними областями дуги та капілярному розтіканню піднімається до верхньої частини дроту. Другий прохід наносимо в протилежному напрямку. Дійшовши до кінця деталі із дроту закінчуємо процес, після чого слід виконати такий самий шов з протилежного боку.

З'єднання пучка дротів з півсфери. Сформувати якісне з'єднання конструктивних елементів художнього виробу із пучка (10 шт.) дротів діаметром 1,2 мм до півсфери товщиною 10 мм. Матеріал виробу – низьковуглецева сталь.

Для полегшення встановлення пучка дротів на поверхні сфери та запобігання деформації їхніх кінців під час нагрівання, у півсфері висвердлено отвір. Пучок дротів перед процесом з'єднання вставлений в отвір, а також зафіксований стяжкою на деякій відстані. Закріплюємо півсферу так щоб пучок був розташований горизонтально (рис. 5, *а*). Процес слід починати вище над пучком на відстані

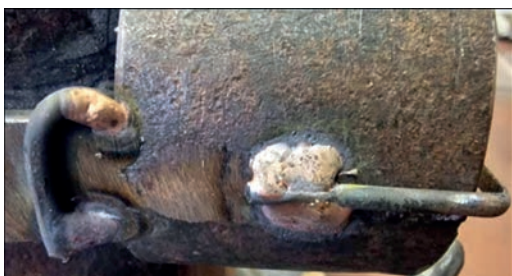


Рис. 4. Зовнішній вигляд з'єднання деталі із дроту діаметром 3 мм та труби діаметром 60 мм із товщиною стінки 3 мм

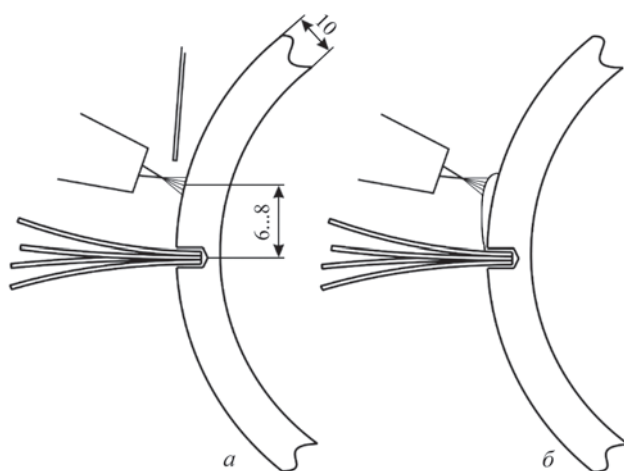


Рис. 5. ПЗ пучка дротів із півсферою: *а* – початок процесу; *б* – розтікання присадки на пучок

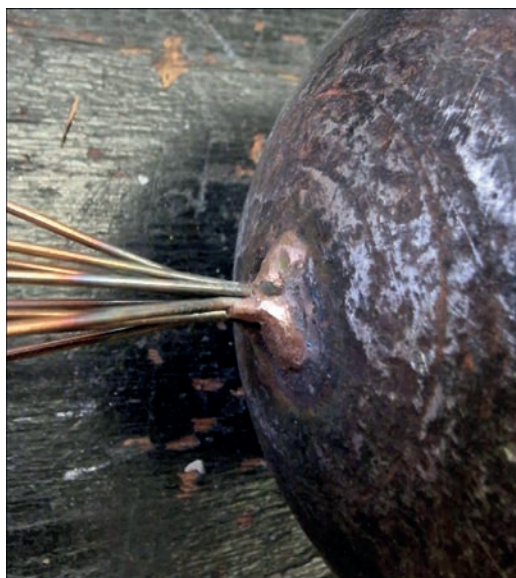


Рис. 6. Зовнішній вигляд ПЗ пучка дротів із півсферою

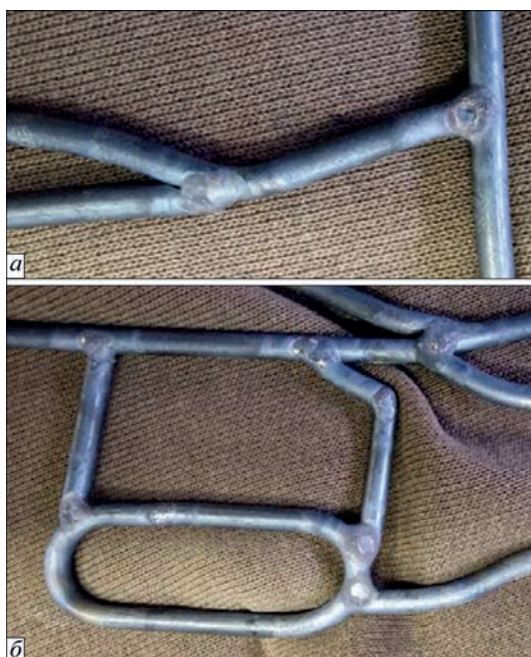


Рис. 7. Зовнішній вигляд з'єднання деталей із дротів діаметром 3, 4 та 5 мм



Рис. 8. Скульптури, отримані за технологією TIG зварювання-паяння, які виготовлені в творчому гуртку Smart Art на кафедрі зварювального виробництва НН ІМЗ ім. Є.О. Патона КПІ ім. Ігоря Сікорського: а – «Мачо»; б – «В Майбутнє!»; в – «Міньйон»; г – процес створення скульптури «Міньйон»; д – відео скульптури «В Майбутнє!»

6...8 мм. Після отримання тонкого шару розплаву на півсфері слід розпочати подавання присадки. Остання під дією сил тяжіння та фізико-хімічних властивостей присадки при нагрівання від тепла дуги розтікається на пучок дротиків (рис. 4, б). Після цього процес слід завершити, повернути півсферу навколо горизонтальної осі та повторити процес з інших двох/трьох сторін пучка.

З'єднання дротів встик. Сформувати якісне з'єднання конструктивних елементів художнього виробу із дротів діаметром 3, 4 та 5 мм, які розташовані в стик та під кутами від 15 до 90°. Матеріал виробу – низьковуглецева сталь.

При традиційному зварюванні дротів під гострим кутом методом TIG внаслідок значного тепловкладення тільки вздовж осі дротів часто призводить до перегріву деталей, розплавлення та

втрати геометричної форми. На додачу, деталі художньої конструкції попередньо згинають, тому при стикуванні вони не знаходяться в одній площині і втрата форми призводить до утворення з'єднань неналежної якості. При електродуговому TIG зварюванні-паянні зі застосуванням дроту CuSi3 процес відбувається при температурах значно нижчих від температур плавлення деталей, тому втрати форми останніх не відбувається (рис. 7).

При формуванні з'єднання дротів під кутами від 45 до 90° достатньо додати присадку і продовжити нагрів нерухомою дугою до повного розтікання CuSi3 вздовж всього перерізу з'єднання. Для з'єднання дротів під гострими кутами від 15 до 45° необхідно починати із гострого кута поступово переміщуючи дугу до зворотної сторони цього кута, а потім повертатись на початок для

плавного розподілу присадки і формування гарного переходу.

Практичне застосування. Розроблені технології електродугового TIG зварювання-паяння з присадкою CuSi3 успішно застосовані при виготовленні скульптур «Мачо», «В Майбутнє!» та «Міньйон» (рис. 8). Роботи проведені у творчому гуртку Smart Art на кафедрі зварювального виробництва НН ІМЗ ім. Є.О. Патона КПІ ім. Ігоря Сікорського, творчий задум та дизайн Сергія Мінакова.

Скульптура «В Майбутнє!» прийнята до участі у виставці зварних художніх виробів «2023 UN Sustainable Development Goals Digital Collection», яка пройде 16–21 липня 2023 р. в Сінгапурі в рамках Щорічної асамблеї Міжнародного інституту зварювання.

Основними конструкційними елементами скульптури є: двотаврове кільце, фігури юнака і дівчини всередині земної кулі, основа та елементи жорсткості позаду кільця. Частина кільця під ногами хлопця та дівчини призначена для занурення в фундамент. Інша частина кільця над фундаментом символізує портал (вхід) в нове життя. Земна куля являє собою безмежні можливості для молодих людей в майбутньому житті.

Розміри скульптури: висота 2,3 м, ширина 2,3 м, глибина 1,5 м. Вага близько 150 кг.

Матеріал конструкції – низьковуглецева сталь.

У виготовленні задіяні технології:

- комп'ютерна обробка фотографії (адаптація реальної фотографії у графіку, створення 3D моделі скульптури);
- лазерне різання сегментів стінки круглого двотавра (гарячекатана сталь товщиною 5 мм);
- термомеханічне виправлення сегментів стінки круглого двотавра;
- холодне кування фігур (суцільний сталевий квадратний профіль 10×10 та 8×8 мм);
- механічне різання;
- вальцювання (земна куля та полиці двотавра);
- електродугове TIG зварювання-паяння присадкою CuSi3 (фігури, земна куля);
- зварювання MAG (з'єднання фігур та земної кулі до полиці двотавра (кільця діаметром 2,3 м),

зварювання двотавра, елемент жорсткості за кільцем двотавра (гнута труба 40×20 мм);

– ММА зварювання основи (швеллер 60 мм), з'єднання з кільцевим двотавром.

Висновки

Використання технології електродугового зварювання-паяння методом TIG із застосуванням мідного дроту CuSi3 значно розширює можливості якісного виготовлення художніх виробів складної геометричної форми із сталі, які мають велику кількість нестандартних з'єднань. Основні переваги технології: плавлення присадки CuSi3 відбувається при температурах менших від температури плавлення основного матеріалу, високий рівень рідкоплинності та гарне змочування поверхні основного матеріалу рідкою присадкою, низький рівень залишкових напружень і деформацій, достатньо високий рівень механічних властивостей з'єднання.

Список літератури/References

1. *Braze Welding* (2023) <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/braze-welding-134>.
2. Стреленко, Н.М. (2014) Фізико-хімічна взаємодія рідкого припою і основного металу в процесі паяння. *Технологические системы*, 3 (68), 41–44.
Strelenko, N.M. (2014) Physical and chemical interaction of liquid solder and base metal in brazing and soldering. *Tekhnologichni Systemy*, 3(68), 41–44 [in Ukrainian].
3. Mou, G. et al. (2017) Study on weld seam surface deposits of CuSi3 CMT brazing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 92 (5–8), 2735–2742. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0349-3>.
4. Лобанов, Л.М., Демченко, Ю.В., Маковецька О.К. та ін. (2022) *Термінологічний словник зі зварювання і споріднених технологій*. Київ, Академперіодика, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України. DOI: <https://doi.org/10.15407/akademperiodyka.474.329>.
Lobanov, L.M., Demchenko, Yu.V., Makovetska, O.K. (2022) *Terminology dictionary on welding and related technologies*. Kyiv, Akademperiodyka, PWI, DOI: <https://doi.org/10.15407/akademperiodyka.474.329>.
5. Єрмолаєв, Г.В., Квасницький, В.В., Квасницький, В.Ф. та ін. (2015) *Паяння матеріалів*. Миколаїв, НУК.
Yermolaev, G.V., Kvasnytskyi, V.V., Kvasnytskyi, V.F. et al. (2015) *Brazing of materials*. Mykolaiv, NUK [in Ukrainian].
6. Weltsch, Z. (2020) Wetting of Non-Reactive and Reactive Metallic Substrates by Brazing Liquids, IOP Conference Series. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/903/1/012035>.
7. Хорунов, В. Ф., Зволінський, І. В., Максимова, С. В. (2013) Дуговая пайка низкоуглеродистых сталей, *Автоматич. сварка*, 4, 23–27.
Khorunov, V.F., Zvolinsky, I.V., Maksymova, S.V. (2013) Arc brazing of low-carbon steel. *The Paton Welding J.*, 4, 21–25.

CuSi3 APPLICATION FOR JOINING ART PRODUCTS BY ARC TIG BRAZE-WELDING

S.M. Minakov, E.P. Chvertko, N.M. Strelenko, A.S. Minakov

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37 Beresetskiy Ave., 03056, Kyiv.

E-mail: minakovsergey61@gmail.com

The paper is devoted to making art products from low-carbon steel. Due to the peculiarities of the design of such products, configuration and relative position of permanent joints and their elements, application of electric arc welding technologies turns out to be limited. The advantages of electric arc braze-welding for making such structures are considered. A detailed description of the implementation of technological tasks, arising in manufacture of real sculptures made of steel, is given, namely joining continuous profiles, joining wire parts to a tube, joining a bundle of thin wires to a semisphere and joining wires of different diameters at sharp angles. A photo and characteristics of the sculptures made with application of TIG braze-welding are given. 7 Ref., 1 Tabl., 8 Fig.

Keywords: steel art products work, TIG braze-welding, CuSi3 filler

Надійшла до редакції 18.04.2023