

УДК 621.78:669.295

## КОРОЗІЙНА ТРИВКІСТЬ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ТИТАНУ, СИНТЕЗОВАНОГО МЕТОДОМ ПОРОШКОВОЇ МЕТАЛУРГІЇ

О. Є. КАПУСТЯН<sup>1</sup>, О. В. ОВЧИННИКОВ<sup>1</sup>, А. А. СКРЕБЦОВ<sup>1</sup>,  
І. М. ПОГРЕЛЮК<sup>2</sup>, Р. В. ПРОСКУРНЯК<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Національний технічний університет, Запоріжжя;

<sup>2</sup> Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Електрохімічними та гравіметричними дослідженнями в агресивних середовищах неорганічних кислот (хлоридна, сульфатна) оцінено корозійну тривкість зварних з'єднань спеченого титану ВТ1-0, отриманих конвекційним зварюванням тертям. Встановлено, що протикорозійні характеристики металу зони термомеханічного впливу вищі порівняно з основним металом через формування одноріднішої структури, її подрібнення та суттєвого підвищення питомої щільності компактованого матеріалу (зменшення розмірів та кількості пор) та відсутність сегрегації домішок. Підтверджено перспективу використання методів зварювання тиском для виготовлення виробів хімічної промисловості зі спеченого титану.

**Ключові слова:** порошкова металургія, спечений титан, зварний шов, мікроструктура, сульфатна та хлоридна кислоти, швидкість корозії.

Титан та його сплави (низьколеговані  $\alpha$ - та псевдо- $\alpha$ -) широко використовують у хімічній та нафтохімічній промисловості як конструкційний корозійно-тривкий матеріал [1] для виготовлення компресорів, коліс відцентрових насосів, запірної арматури (крани, клапани, засувки, заслінки) тощо. Традиційно такі вироби отримують методами лиття і деформаційної обробки. Для виготовлення виробів складної форми з мінімальними відходами часто застосовують технології зварювання. Здебільшого залишковий ресурс виробів визначають міцнісні характеристики. Залежно від конкретних умов експлуатації міцність зменшується через корозійні пошкодження. Тому надійна і довговічна робота таких виробів і їх зварних з'єднань здебільшого пов'язана з корозійною тривкістю.

Значний термін промислової експлуатації існуючого обладнання та метало-конструкцій у хімічній галузі зумовлює актуальність завдання відновлення основних фондів. До деталей цивільного призначення, крім високих технічних, ставлять вимоги щодо вартості. Це, насамперед, стосується технологій виробництва. Тому для ширшого застосування титанових сплавів у різних конструкціях необхідно не тільки створювати нові матеріали на основі титану з вищими експлуатаційними характеристиками, але і вдосконалювати виробництво титанових напівфабрикатів [2]. На сьогодні найперспективнішими є ті напрямки наукових досліджень титанових сплавів, які націлені на скорочення витрат виробництва та оброблення [3]. З огляду на це, актуальним є розроблення ресурсозберігаючої технології отримання заготовок з титанових сплавів на базі існуючих потужностей виробництва титану. Перспективними є технології, які ґрунтуються на методах порошкової металургії (ПМ). Характерною рисою матеріалів, отриманих методом ПМ, є залишкова поруватість, яка негативно впливає на корозію.

Контактна особа: О. Є. КАПУСТЯН, e-mail: aek@zntu.edu.ua

Мета роботи – дослідити вплив структури зварних з'єднань спеченого технічного титану, отриманих конвекційним зварюванням тертям, на кінетику анодного розчинення і закономірності хімічного розчинення в агресивних середовищах хімічної промисловості.

**Матеріали та методика випробувань.** Досліджували зразки, отримані методом ПМ з порошку титану марки ПТЗ-1 (фракція  $-0,63/+0,18$ ; ТУ У 14-10-026-98). Порошок пресували на гідравлічному пресі за навантаження 700 МПа. Спікали заготовку у вакуумній електропечі СНВЭ-1.3.1/16 ИЗ за температури  $1250 \pm 20^\circ\text{C}$  і вакууму 13,3 Па, витримували 3 h та охолоджували разом з піччю. Отримані зразки мали закрити поруватість 5...7%. Хімічний склад усіх зразків відповідав титану ВТ1-0 (ГОСТ 19807-91).

Подано схеми заготовок порошкового титану ВТ1-0 після спікання (рис. 1а), які проточували до розмірів, що моделюють корпус запірної арматури, і зварювали методом конвекційного зварювання тертям (рис. 1б).

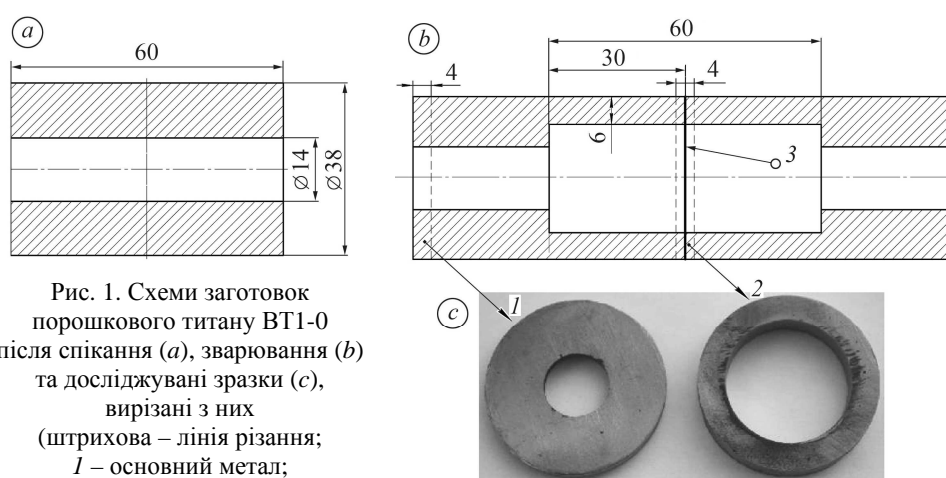


Рис. 1. Схеми заготовок порошкового титану ВТ1-0 після спікання (а), зварювання (б) та досліджувані зразки (с), вирізані з них (штрихова – лінія різання; 1 – основний метал; 2 – зона шва та термомеханічного впливу; 3 – зварний шов).

Fig. 1. The blanks of titanium ВТ1-0 powder alloy after sintering (а), welding (б) and tested samples (с) cut out of them (dashed – cutting line; 1 – base metal; 2 – weld zone and thermomechanical impact zone; 3 – weld).

Досліджували на зоні термомеханічного впливу товщиною 1,5...2,5 mm (рис. 1б, зразок 2). Відомо, що пресовані заготовки мають змінну поруватість за висотою, тому для гарантування однакової вихідної щільності матеріалу контрольні зразки основного металу (рис. 1б, зразок 1) вирізали з протилежного місця зварювання боку. Поверхню зразків після електроерозійного різання шліфували і полірували.

Зварювали заготовки для механічних випробувань і металографічних досліджень на модернізованій машині МСТ-2, яка забезпечує цикл зварювання за постійної частоти обертання  $28,8 \text{ s}^{-1}$ . Тиск проковки дорівнював тиску нагріву 20 МПа, час нагрівання 2,5 s. Зварювали без додаткового захисту, оскільки це не впливає на структуру металу шва. Під час зварювання на повітрі метал окиснюється на глибину до 0,5 mm, тому для стабілізації механічних властивостей виконували механічну обробку на токарному верстаті зі зняттям поверхневого шару, насиченого газом. Мікроструктуру досліджували на металографічному мікроскопі “Observer.D1m” та електронному JSM-6360LA. Об’ємну кількість пор визначали лінійним методом як відношення суми довжин ліній, що перетинають пори, до загальної їх довжини.

Швидкість корозії розраховували гравіметричним методом за зміною маси зразків (ГОСТ 9.908-85) після експозиції (240 h) в агресивному середовищі (20% розчин хлоридної кислоти та 40% сульфатної, без перемішування, за вільного доступу повітря та кімнатної температури), використовуючи ваги Voyager фірми "OHAUS". Зміну маси фіксували з точністю  $\pm 0,0001$  g. Розчини готували з хімічно чистих кислот за ГОСТ 3118-77 та ГОСТ 4204-77 відповідно і дистильованої води за ГОСТ 6709-72. Результати досліджень обробляли методами математичної статистики.

Електрохімічні дослідження здійснювали з використанням потенціостату РС-рго у потенціодинамічному режимі. Експериментували за допомогою трьох-електродної скляної комірки (50 ml) з платиновим електродом і насиченим Ag/AgCl електродом порівняння. Поверхню робочого електрода з титану покривали хімічно стійким лаком ХС-75, залишаючи місце ( $1 \text{ cm}^2$ ) для витримки в електроді. Зануривши зразок у розчин, зміну потенціалу в часі вимірювали упродовж 1 h з інтервалом 0,5 s. Поляризаційні криві знімали в області потенціалів  $-1,0 \dots 1,5$  V за швидкості розгортки потенціалу 2 mV/s. Потенціал і струми корозії визначали графічним методом екстраполяції Тафеля. Експеримент повторювали принаймні три рази для кожного зразка.

**Результати та їх обговорення.** У зварних з'єднаннях титанових сплавів, отриманих традиційними методами, за корозійного впливу середовища найвразливішою ділянкою є зона термічного впливу [4, 5], хоча є можливість підвищеної корозії і в зварних швах [1]. Вразливість зони термічного впливу пов'язана з максимальними розтягувальними залишковими зварювальними напруженнями, отриманими внаслідок локального розплавлення [6, 7]; електрохімічною гетерогенністю, обумовленою структурною (різні швидкості охолодження формують різні типи та розміри структури), хімічною (сегрегація домішок та легувальних елементів із основного металу в зварювальну ванну) [8, 9], геометричною та фізичною неоднорідністю [10].

Істотно на корозію зварних з'єднань впливає технологія зварювання [11, 12]. За зварювання плавленням корозійна тривкість залежить від зміни хімічного складу металу шва в результаті використання зварювальних матеріалів (електроди, дріт, флюси), структурних змін у металі шва та в зоні термічного впливу внаслідок розплавлення, а також від сегрегації легувальних елементів. Методи зварювання тиском мають переваги в цьому сенсі [13]. Але і тут корозійні властивості зварних з'єднань титанових сплавів чутливі до структурного стану матеріалу [14, 15]. Зокрема, за деяких видів зварювання в зоні термомеханічного впливу зерна можуть бути зорієнтовані нормально до поверхні деталі, що робить її максимально вразливою до міжкристалітної корозії [16]. Ці результати і обумовили вибір об'єкта дослідження – зварного з'єднання спеченого технічно чистого титану, виконаного конвекційним зварюванням тертям. Використання технічно чистого титану ВТ1-0 дає змогу не враховувати вплив на корозійну тривкість таких чинників, як додаткові напруження за фазових перетворень, сегрегування як легувальних елементів, так і домішок втілення [17], текстурна неоднорідність. Також технічний титан не потребує додаткової термічної обробки після зварювання. Корозійні дослідження таких зварних з'єднань титану, отриманого методом ПМ, їх взаємозв'язок з структурним станом матеріалу дозволять оцінити можливість використання методів зварювання тиском спеченого титану для виготовлення напівфабрикатів і виробів хімічної промисловості.

На рис. 2 подані результати металографічних досліджень мікроструктури різних ділянок зварного з'єднання спеченого технічно чистого титану, виконаного конвекційним зварюванням тертям.

Під час спікання титанового порошку формується структура, притаманна однофазним титановим сплавам – зерна  $\alpha$ -фази із замкнутими неправильної форми та відкритими порами (рис. 2a). Структура зони термомеханічного впливу, яка складається з двох областей, різнорідна. В області, яка межує з основним металом, структура перехідного типу – формується зі зерен  $\alpha$ -фази, дрібніших, ніж зерна основного металу (рис. 2b). Структура області, яка межує зі зварним швом, представляє собою орієнтовані в одній площині витягнуті зерна  $\alpha$ -титану, розташовані перпендикулярно прикладеному навантаженню (рис. 2c). По всій довжині зварного з'єднання мікроструктура однорідна, утворюються загальні зерна, зварювальних дефектів не спостерігаємо, що свідчить про якісне зварне з'єднання. Зерна в зоні з'єднання дрібніші, ніж в зоні термомеханічного впливу.



Рис. 2. Мікроструктура зварного з'єднання спеченого титану BT1-0:  
*a* – основний метал; *b* – зона термомеханічного впливу поблизу основного металу;  
*c* – зона зварного шва та термомеханічного впливу поблизу нього.

Fig. 2. Microstructures of the welded joint of sintered BT1-0 titanium:  
*a* – base metal; *b* – zone of thermomechanical impact near the base metal;  
*c* – weld zone and thermomechanical impact nearby.

Замкнуті пори розташовані як за межами зерен, так і в тілі зерна, а відкриті мають різні конфігурації. Розміри замкнутих пор у спеченому матеріалі зменшуються від 70  $\mu\text{m}$  за переходу від основного металу через зону термомеханічного впливу до 5  $\mu\text{m}$  і в зварному шві не перевищують 3  $\mu\text{m}$ . Крім цього, знижується і їх об'ємна частка від 7% пор в основному металі до 1% у зварному шві, що свідчить про зменшення пор і можливе їх “заліковування” під дією температури та зсувної деформації. Таким чином, у зоні термомеханічного впливу середній розмір пор менший, ніж в основному металі, також існує ефект часткового і повного “заліковування” пор. У зварному шві структура однорідніша зі суттєво вищою щільністю компактованого матеріалу, пори практично відсутні (рис. 2c).

На рис. 3 подані потенціодинамічні поляризаційні криві, зняті з різних зон зварного з'єднання (основного металу, шва та термомеханічного впливу) (див. рис. 1c) спеченого титану BT1-0 у 20% водному розчині хлоридної та 40% водному розчині сульфатної кислот. Оскільки хімічний склад усіх тестованих зразків однаковий і відповідає титану BT1-0 (ГОСТ 19807-91), то характер поляризаційних кривих і електрохімічних процесів, спричинених взаємодією титану з агресивним середовищем, подібний. Усі досліджувані зразки кородують в умовах пасивації.

На анодній гілці потенціодинамічної кривої, знятої зі зразка зони основного металу (рис. 3a, крива 1), в діапазоні потенціалів  $-0,25 \dots -0,35$  V спостерігаємо анодне розчинення. За потенціалів  $0,38 \dots 1,5$  V фіксуємо пасивну ділянку, обумовлену, ймовірно, утворенням нестехіометричних оксидів титану, які формуються на поверхні, сповільнюють процес [18]. Густина струму пасивації становить  $10 \text{ A/m}^2$ .

Потенціал корозії зразка зони шва та термомеханічного впливу порівняно з основним металом ушляхетнюється ( $-0,270$  проти  $-0,365$  V). Густина струму ко-

розії знижується (0,162 проти 0,207  $A/m^2$ ). За потенціалів 0,10...0,32 V спостерігаємо коротку пасивну ділянку. Густина струму пасивації становить 2,5  $A/m^2$ . Другу пасивну область, зумовлену, очевидно, формуванням на поверхні продуктів корозії, які сповільнюють процес [19], фіксуємо в діапазоні потенціалів 0,46...1,36 V. Густина струму перепасивації 4  $A/m^2$ .

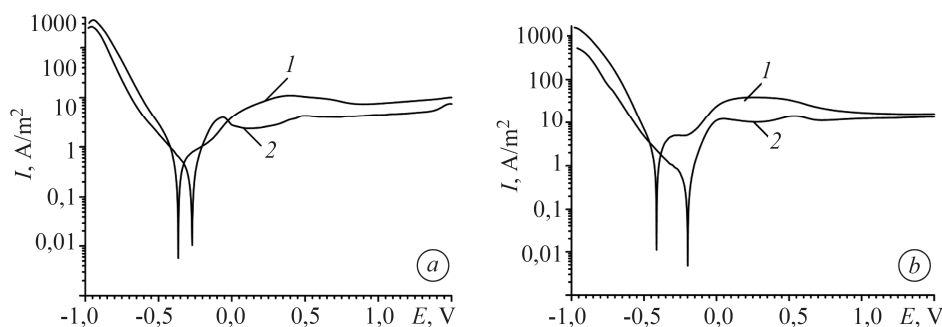


Рис. 3. Поляризаційні криві спеченого титану BT1-0, зняті у водних розчинах 20% хлоридної (а) та 40% сульфатної (b) кислот: 1 – зразок основного металу; 2 – зразок зони шва та термомеханічного впливу.

Fig. 3. Polarization curves of BT1-0 sintered titanium recorded in aqueous solution of 20% chloride (a) and 40% sulfate (b) acids: 1 – base metal; 2 – weld zone sample and thermomechanical impact zone.

На анодній гілці потенціодинамічної кривої, знятої зі зразка основного металу (рис. 3b, крива 1) у 40% водному розчині сульфатної кислоти, явно виражені дві активні ділянки, які обумовлені, ймовірно, розчиненням поверхні (-0,39...-0,28 V) та її окисненням із утворенням стійких оксидних фаз (-0,2 до 0,12 V). За потенціалів -0,28...-0,18 V спостерігаємо коротку пасивну область, струм пасивації становить 5  $A/m^2$ . Відновлення поверхневої плівки внаслідок утворення продуктів корозії за потенціалів 0,12...1,5 V пасивує поверхню. Струм перепасивації 20  $A/m^2$ .

Як і в розчині хлоридної кислоти, у розчині сульфатної кислоти потенціал корозії зразка зони шва та термомеханічного впливу порівняно з потенціалом зразка основного металу ушляхетнюється (-0,196 проти -0,416 V), що відповідає умові рівностійких зон зварного з'єднання для забезпечення опору електрохімічній корозії при виборі матеріалів та методів зварювання [20]. Густина струму корозії знижується (0,151 проти 0,77  $A/m^2$ ). На анодній гілці зразка зони шва та термомеханічного впливу (рис. 3b, крива 2) у 40% розчині сульфатної кислоти за потенціалів 0,06...0,44 V спостерігаємо першу, а в діапазоні потенціалів 0,669...1,5 V фіксуємо другу пасивну ділянку. Густина струму пасивації та перепасивації становить 10  $A/m^2$ .

Таким чином, в обох досліджуваних агресивних середовищах пасивація та перепасивація зразків зони шва та термомеханічного впливу протікають за тими ж механізмами, що і в основному металі. Спостережуване ушляхетнення потенціалу корозії зразків зони шва та термомеханічного впливу, а також нижчі густини струмів корозії і анодного розчинення, очевидно, пов'язані з формуванням одноріднішої структури, її подрібненням, суттєвим підвищенням питомої щільності компактованого матеріалу (зменшенням розмірів та кількості пор) та відсутністю сегрегації домішок.

Результати вагової корозії (див. таблицю) та візуальні спостереження зразків зварного з'єднання спеченого титану (рис. 4) впродовж експозиції 240 h у водних розчинах хлоридної та сульфатної кислот показали кореляцію з електрохімічними дослідженнями.

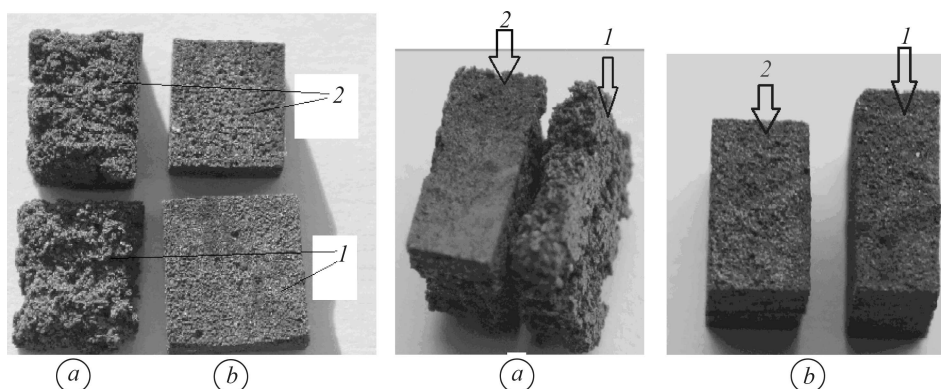


Рис. 4. Зразки основного металу (1) і зони шва та термомеханічного впливу (2) після експозиції 240 h у водних розчинах 20% хлоридної (a) та 40% сульфатної (b) кислот.

Fig. 4. Samples of the base metal (1) and weld zone and thermomechanical impact zone (2) after 240 h exposure in aqueous solutions of 20% chloride (a) and 40% sulfate (b) acids.

#### Корозійні характеристики спеченого титану VT1-0 у розчинах кислот

Середовище	$K_{\text{corr}}$ , g/(m <sup>2</sup> ·h)	
	зона основного металу	зона шва та термомеханічного впливу
20% розчин хлоридної кислоти	12,138	7,952
40% розчин сульфатної кислоти	0,967	0,921

Швидкість корозії зразка зони шва та термомеханічного впливу у 20% водному розчині хлоридної кислоти в 1,5 рази менша, ніж зразка основного металу. У 40% водному розчині сульфатної кислоти швидкості корозії зразків як основного металу, так і зони шва та термомеханічного впливу сумірні, проте з тенденцією до зменшення швидкості корозії останнього. Отримані закономірності, очевидно, пов'язані зі зменшенням розмірів пор і їх кількості в зоні термомеханічного впливу, бо саме вони сприяють потраплянню агресивного середовища вглиб металу, через що збільшується фактична площа його контактування з матеріалом.

Швидкість корозії зразка основного металу у 12,6 разів нижча у 40% водному розчині сульфатної кислоти, ніж у 20% водному розчині хлоридної кислоти. Для зразка зони шва та термомеханічного впливу цей показник нижчий і становить 8,6 разів.

#### ВИСНОВКИ

Корозійні характеристики у водних розчинах хлоридної та сульфатної кислот корелюють зі структурними характеристиками різних зон зварного з'єднання спеченого титану VT1-0. Корозійна дія 20% водного розчину хлоридної кислоти на досліджувані зразки суттєво перевищує вплив 40% водного розчину сульфатної кислоти. Протикорозійні характеристики металу зони термомеханічного впливу зварного з'єднання спеченого титану VT1-0, отриманого конвекційним зварюванням тертям, вищі порівняно з основним металом через формування одноріднішої структури, її подрібнення, суттєвого підвищення питомої щільності компактованого матеріалу (зменшення розмірів та кількості пор) та відсутність сегрегації домішок. З великою вірогідністю можна стверджувати і про ще вищі протикорозійні характеристики металу зони зварного шва. З огляду на те, що

конвекційне зварювання тертям задовольняє вимоги рівностійкості зон зварного з'єднання, його можна використовувати для отримання виробів зі спеченого технічного титану, які будуть працювати в хімічній промисловості в агресивних середовищах.

*РЕЗЮМЕ.* Электрохимическими и гравиметрическим исследованиями в агрессивных средах неорганических кислот (хлоридная, сульфатная) оценена коррозионная стойкость сварных соединений спеченного титана BT1-0, полученных конвекционной сваркой трением. Установлено, что противокоррозионные свойства металла зоны термомеханического воздействия выше по сравнению с основным металлом в результате формирования однородной структуры, ее измельчения, существенного повышения удельной плотности компактированного материала (уменьшения размеров и количества пор) и отсутствия сегрегации примесей. Подтверждено перспективу использования методов сварки давлением для изготовления изделий химической промышленности из спеченного титана.

*SUMMARY.* Corrosion resistance of welded joints of sintered BT1-0 titanium obtained by convectional friction welding was evaluated by electromechanical and gravimetric testing in aggressive media of inorganic acids (chloride, sulfate). It was established that anticorrosive properties of the metal in the zone of thermomechanical impact are higher as compared to the base metal due to formation of more homogeneous structure, its finer structure and substantial growth in specific density of compacted material (by decreasing the size and number of pores) and lack of impurities segregation. The prospect for using pressure the welding methods to manufacture products made from sintered titanium used in chemical industry is confirmed.

1. *Влияние* технологии изготовления полуфабрикатов из титанового сплава AT3 на коррозионную стойкость сварных соединений / В. Е. Блащук, В. Н. Замков, Л. М. Оноприенко, Г. М. Шеленков, В. Э. Трояновский // Автомат. сварка. – 1994. – № 1 (490). – С. 33–35.
2. *Получение* полуфабрикатов титановых сплавов для авиационно-космической техники / А. Е. Капустян, А. В. Овчинников, Т. А. Коваленко, А. В. Шевченко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2016. – № 7 (134). – С. 107–116.
3. *Кусакина Ю. Н., Федорова Л. В.* Применение концепции жизненного цикла производственных технологий при определении перспективных направлений научных исследований титановых сплавов // Титан. – 2017. – № 3. – С. 50–53.
4. *Рускол Ю. С.* Титановые конструкционные сплавы в химических производствах: Справ. изд. – М.: Химия, 1989. – 288 с.
5. *Блащук В. Е., Поляков С. Г.* Ускоренное определение склонности сварных соединений титановых сплавов к коррозионному растрескиванию // Автомат. сварка. – 1996. – № 6 (519). – С. 13–16.
6. *Коррозионное* растрескивание сварных соединений высокопрочного титанового сплава / А. А. Труфанов, Р. К. Мелехов, О. Д. Смиян, В. А. Шер // Автомат. сварка. – 1990. – № 5 (446). – С. 31–36.
7. *Коррозионная* стойкость сварных соединений титанового сплава AT3 в растворах серной кислоты / О. Д. Смиян, Г. М. Григоренко, В. Е. Блащук, Е. И. Буткова, Л. М. Оноприенко, А. А. Труфанов // Автомат. сварка. – 1989. – № 12 (441). – С. 41–44.
8. *Коррозионная* стойкость сварных соединений некоторых титановых сплавов / Г. М. Шеленков, В. Э. Трояновский, В. Е. Блащук, Л. М. Оноприенко // Автомат. сварка. – 1985. – № 4 (385). – С. 19–20.
9. *Леонов В. П., Михайлов В. И., Сахаров И. Ю.* Влияние термических циклов различных методов сварки на структуру и коррозионно-механические свойства сварных соединений псевдо- $\alpha$ -сплавов титана // Сб. тр. Междунар. конф. “Ti-2011 в СНГ” (Львов, 25–28 апреля 2011 г.). – К.: РИО ИМФ им. Г. В. Курдюмова НАН Украины, 2011. – С. 71–79.
10. *Махненко В. И., Шекера В. М., Оноприенко Е. М.* Определение параметров упрощенной диаграммы статической коррозионной трещиностойкости трубных сталей при почвенной коррозии // Автомат. сварка. – 2008. – № 10. – С. 31–35.
11. *Солевая* коррозия сварных соединений сплава AT6 / В. Е. Блащук, Л. М. Оноприенко, Г. М. Шеленков, В. Э. Трояновский // Автомат. сварка. – 1990. – № 3. – С. 68–69.

12. *Солевая коррозия сплава АТЗ и сварных соединений* / М. А. Лангер, В. Е. Блашук, Л. М. Оноприенко, Г. М. Шеленков // *Автомат. сварка*. – 1983. – № 10. – С. 69–70.
13. *Особенности формирования структурной и химической неоднородности в сварных соединениях экспериментальных титановых сплавов системы Ti–Si–X, выполненных прессовой сваркой* / Т. Г. Таранова, Г. М. Григоренко, С. В. Ахонин, В. К. Сабокарь, О. М. Задорожнюк, Т. Г. Соломийчук, Е. В. Половецкий // *Сб. тр. Междунар. конф. “Ti-2013 в СНГ”* (Донецк, 26–29 мая 2013 г.). – К.: РИО ИМФ им. Г. В. Курдюмова НАН Украины, 2013. – С. 214–220.
14. *Свариваемость и служебные характеристики титанового листа ВТ6, полученного методами ВДП и ЭЛП* / С. В. Ахонин, В. Ф. Топольский, Р. Н. Мищенко, И. К. Петриченко, Э. Л. Вржижевский // *Сб. тр. Междунар. конф. “Ti-2006 в СНГ”* (Суздаль, 21–24 мая 2006 г.). – К.: *Наук. думка*, 2006. – С. 44–50.
15. *Чернышова Ю. В.* Закономерности влияния объемной и поверхностной структуры на электрохимическую коррозию имплантатов из сплавов на основе титана и никелида титана: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2008. – 22 с.
16. *Повышение коррозионной стойкости сварных соединений высокопрочных алюминиевых сплавов плакированием взрывом* / С. Ю. Илларионов, Л. Д. Добрушин, С. Г. Поляков, Г. Е. Боева // *Автомат. сварка*. – 2005. – № 2. – С. 52–55.
17. *Капустян А. Е.* Получение длинномерных полуфабрикатов из спеченных титановых сплавов сваркой трением // *Автомат. сварка*. – 2015. – № 3–4. – С. 55–59.
18. *Pohrelyuk I. M., Tkachuk O. V., and Proskurnyak R. V.* Corrosion resistance of the Ti–6Al–4V titanium alloy with nitride coatings in 0.9% NaCl // *J. of the Minerals, Metals & Materials Society*. – 2011. – **63** (6). – P. 35–40.
19. *Електрохімічна поведінка титану, синтезованого методом порошкової металургії, у хлоридній кислоті* / І. М. Погрелюк, О. В. Овчинников, А. А. Скребцов, Б. П. Бахматюк, Х. С. Швачко // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2016. – **52**, № 2. – С. 92–97.  
*Electrochemical behavior of titanium synthesized by the method of powder metallurgy in hydrochloric acid* // I. M. Pohrelyuk, O. V. Ovchynnykov, A. A. Skrebtsov, B. P. Bakhmatyuk, Kh. S. Shvachko // *Materials Science*. – 2016. – **52**, № 2. – P. 246–252.
20. *Стеглов О. И., Антонов А. А., Севостьянов С. П.* Обеспечение целостности сварных конструкций и сооружений при их длительной эксплуатации с применением реновационных технологий // *Автомат. сварка*. – 2014. – № 6–7 (733). – С. 1–6.

Одержано 14.12.2017