

## КОНСТРУКЦІЙНІ І ФУНКЦІОНАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ STRUCTURAL AND FUNCTIONAL MATERIALS

УДК 669.018.2:620.18]:621.771

- Міщенко В. Г. д-р техн. наук, професор, професор кафедри інтегрованих технологій зварювання та моделювання конструкцій Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: mishchen4@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0992-478X
- Беліков С. Б. д-р техн. наук, професор, професор кафедри автомобілів Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: belikov@zpu.edu.ua, ORCID: 0000-0002-9510-8190
- Клімов О. В. канд. техн. наук., доцент, декан інженерно-фізичного факультету Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: klimovo@zntu.edu.ua, ORCID: 0000-0003-1248-6645
- Кріпак А. О. аспірантка кафедри загальної та прикладної фізики Запорізького національного університету, м. Запоріжжя, Україна, e-mail: aliona127k@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3415-1272
- Тонконог Д. М. аспірант кафедри загальної та прикладної фізики Запорізького національного університету, м. Запоріжжя, Україна, e-mail: tonkonohd@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2642-5333
- Корнієнко В. В. аспірант кафедри інтегрованих технологій зварювання та моделювання конструкцій Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: vkornienko268@gmail.com, ORCID: 0009-0007-2193-3204
- Харченко А. О. аспірант кафедри інтегрованих технологій зварювання та моделювання конструкцій Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: harchenko21@gmail.com, ORCID: 0009-0004-3378-6596

### СТВОРЕННЯ СПЕЦІАЛЬНОГО КОНСТРУКЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ МЕТОДОМ ПРОКАТУВАННЯ АСИМЕТРИЧНИХ ПАКЕТІВ ДЛЯ ВИРОБІВ ПОДВІЙНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

**Мета роботи.** Об'єктом дослідження було створення біметалевого матеріалу з підвищеними механічними та експлуатаційними властивостями методом прокатування асиметричних пакетів. За попередніми результатами досліджень структури та властивостей були вибрані оптимальні склади основи та плакувального шару біметалевої заготовки з найменшою різницею коефіцієнтів термічного розширення. За допомогою асиметричного прокатування пакетів основи – сталь 14X17H13КМБч + плакувального шару – сталь 03X17H3Г9МБДЮч виготовлено біметалеву заготовку, яка мала низькі напруження в зварному шві та зоні термічного впливу, на відміну від пакету 14X17H13КМБч+10ХФТБч. Тому в процесі магністермічного виробництва губчастого титану на зразках біметалу не спостерігали жолоблення та термічних тріщин. Натікання нікелю в губчастий титан з поверхні плакувального шару в процесі відновлення не перевищувало 0,004 % мас. в перших п'яти блоках титану з початку експлуатації.

**Методи дослідження.** Металографічний, дюрOMETричний, дилатометричний.

**Отримані результати.** За допомогою дилатометричного дослідження були отримані коефіцієнти теплового розширення зразків сталей основи – 14X17H13КМБч, та сталей плакувального шару – 10ХФТБч та 03X17H3Г9МБДЮч. В результаті досліджень близьких до виробничих умов отримано біметалеву заготовку, яка не піддається жолобленню, є тріщиностійкою та не спричиняє натікання нікелю у титанову губку.

**Наукова новизна.** На основі експериментальних даних встановлений розвиток руйнування внутрішньої поверхні реакторів магністермічного процесу отримання губчастого титану, яка зазнає дії температури, механічного навантаження і періодичного контакту з тетрахлоридом титану, рідким магнієм та хлоридом магнію, що призводить до жолоблення, появи тріщин реактору та натікання нікелю в титанову губку. Показано, що для усунення цих небажаних явищ необхідно застосовувати біметалевий матеріал різного хімічного складу з близькими структурою та фізико-механічними властивостями: коефіцієнту термічного розширення, твердості та границі міцності.

**Практична цінність.** На підставі результатів досліджень розроблено хімічний склад основи – сталь 14X17H13KMБч, плакувального шару – сталь 03X17H3Г9МБДЮч та режим гарячої деформації, що дозволило отримати необхідні структури, фізико-механічні та службові властивості.

**Ключові слова:** асиметричний пакет, біметалева заготовка, жолоблення, зона термічного впливу, магніє-термічне виробництво губчастого титану, плакувальний шар, реактор, сталь-основа.

## Вступ

Вимоги до спеціальних матеріалів, які застосовують в аерокосмічній галузі невинно динамічно зростають. Відповідно до них ускладнюються хімічні склади, способи та технології виготовлення матеріалів із значним різноманіттям функціональних властивостей. Наприклад, відома американська фірма «Boeing» обмежила вміст нікелю в лопаточних титанових сплавах до  $\leq 0,004\%$  мас., наприклад Ti-6Al-4V [1], що спричинило проблему промислового виробництва губчастого титану на всіх існуючих підприємствах світу, які застосовують магнієтермічний метод його отримання, який є єдиним комерційним методом виготовлення титанової губки в Україні [2]. Забруднення нікелем титанової губки, в процесі її виготовлення, відбувається за рахунок натікання компонентів хромонікелевих сталей типу AISI 304, AISI 321, 05X18H10T ДСТУ із внутрішніх стінок реактору [3, 4]. Авторами запропоновано сплав для виготовлення реторт [5]. Попередніми дослідженнями корозійної тривкості перспективних сталей для виготовлення реакторів не встановлено безнікелевого сплаву [6]. Захист від забруднень титанової губки із внутрішніх стінок реактору і, водночас, збільшення терміну його експлуатації можливий тільки за рахунок створення біметалевого матеріалу для виготовлення реактору з різними службовими властивостями його внутрішньої і зовнішньої поверхні [7, 8].

Дослідженнями при створенні біметалу з використанням методу зварювання тиском [9] із сталей 10ХФТБч+14Х17Н13КМБч спостерігали появу тріщин у зварному шві, які утворилися в результаті значної різниці коефіцієнтів термічного розширення сталей (рис. 1). До того ж використання реактору з біметалу (10ХФТБч+14Х17Н13КМБч) на виробництві показало його ненадійність через жолоблення при нагріванні та охолодженні.

В роботі розглядається можливість заміни плакувального шару біметалу зі сталі 10ХФТБч на сталь 03Х17Н3Г9МБДЮч [10]. Встановлено, що різниця коефіцієнтів термічного розширення сталей плакувального шару 03Х17Н3Г9МБДЮч та основи біметалу 14Х17Н13КМБч [11] значно менша ніж сталей (10ХФТБч+14Х17Н13КМБч), а при підвищенні температури з 200 °С до 1000 °С вона ще зменшується (рис. 2). Структурний стан основи біметалевої заготовки – (аустеніт + карбіди) і плакувального шару – (теж аустеніт + карбіди) при робочій температурі 850 °С не змінюється в процесі всього терміну експлуатації [12, 13].

В роботі [14] розглядається проблема пластичного деформування реактору в процесі відновлення тетраклориду титану, в якій встановлено вимоги до матеріалу реакторів, що попереджують появу пластичної

деформації при температурі експлуатації 950 °С: коефіцієнт лінійного розширення  $\alpha \leq 20 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , умовна границя плинності  $\sigma_{0,2} \geq 120 \text{ МПа}$ . А в роботі [15] розглянуто метод відновлення вихідної форми реторти, що значно ускладнює технологічний процес отримання високоякісної титанової губки.



**Рисунок 1.** Біметалева заготовка із сталей 14Х17Н13КМБч+10ХФТБч, яка отримана методом прокатування асиметричних пакетів

## Мета роботи

Основною метою досліджень було обрати раціональні хімічні склади плакувального шару та основи для виготовлення біметалу методом прокатування асиметричних пакетів з підвищеними фізико-механічними та експлуатаційними властивостями.

## Матеріал і методика досліджень

Дослідження впливу режиму гарячої деформації прокатуванням асиметричних пакетів виконували на сталях:

- аустенітний клас 14Х17Н13КМБч – основа;
- аустенітно-феритний клас 03Х17Н3Г9МБДЮч – плакувальний шар;
- ферито-перлітний клас 10ХФТБч – плакувальний шар.

Лабораторні сталі виготовили в індукційній печі масою розплав 120 кг з основною футеровкою.

Після зачищення по великим граням сталь основи та сталь плакувального шару збирали у пакет і місця з'єднання зварювали по периметру (рис. 6). Гаряче прокатування асиметричних пакетів виконували при 1100 °С і ступенем деформації  $\varepsilon = 50\%$  (рис. 7а, б).

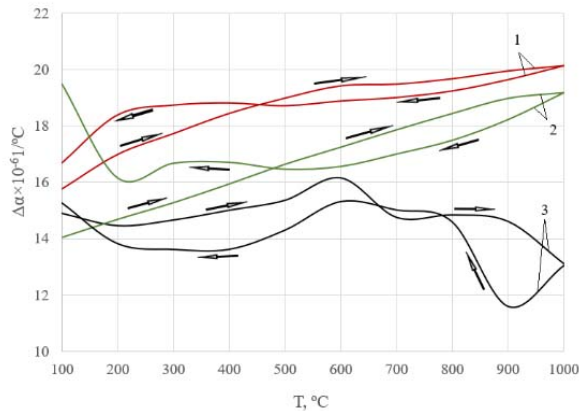
Твердість вимірювали на приладі «Роквелл» за шкалою HRB 30/100 з похибкою  $\pm 1,5 \text{ HRB}$ .

Визначення коефіцієнтів термічного розширення дослідних сталей виконували на диференціальному dilatометрі «Schewenard» в умовах рівномірного нагрівання від 20 °С до 1000 °С та швидкого та повільного охолодження (рис. 2, 3).

Дослідження мікроструктури зварених з'єднань проводили на мікроскопі МИМ-8 при збільшенні 180 раз. Травлення зразків виконували хімічним способом в реактиві Вілела наступного складу: пікринова кислота – 5 мл, етиловий спирт – 95 мл, або у реактиві для титану: HF – 20 мл, HNO<sub>3</sub> – 20 мл, вода – 60 мл.

### Результати досліджень та їх обговорення

Для визначення залежностей коефіцієнтів термічного розширення сталей від температури нагріву, швидкого та повільного охолодження, проведені дилатометричні випробування зразків основи сталі 14X17H13KMБч і плакувального шару сталей 03X17H3Г9МБДЮч та 10ХФТБч (рис. 2, 3).



**Рисунок 2.** Дилатометричні криві залежності коефіцієнту термічного розширення досліджуваних сталей від температури нагріву та швидкого охолодження:

1 – 14X17H13KMБч; 2 – 03X17H3Г9МБДЮч;  
3 – 10ХФТБч

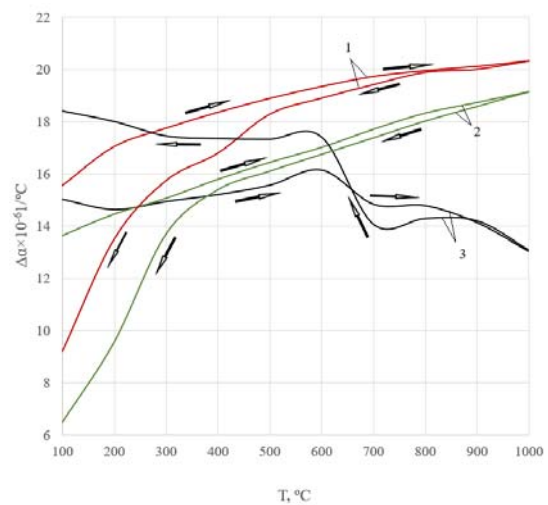
Швидке охолодження сталі 10ХФТБч призводить до різкої зміни коефіцієнту термічного розширення. Мікроструктура сталі 14X17H13KMБч – основи біметалу є стабільний легований аустеніт, тому коефіцієнт термічного розширення залишається незмінним при робочих температурах реактору (див. рис. 2). У біметалі (10ХФТБч+14X17H13KMБч) при 910 °C різниця коефіцієнтів термічного розширення досягає максимуму –  $6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  і спричиняє виникнення напружень, які призводять до жолоблення та появи тріщин реакторів.

Сталь 03X17H3Г9МБДЮч має подібну поведінку коефіцієнту термічного розширення від зміни температури, як і основа біметалу сталь 14X17H13KMБч і, відповідно, мінімальну різницю коефіцієнтів термічного розширення при швидкому та повільному охолодженні (рис. 2, 3). Лише при температурі близько 225 °C відбувається часткове перетворення сталі 03X17H3Г9МБДЮч, яке не може бути причиною появи тріщин при порівняно низьких температурах  $\leq 300$  °C.

При повільному охолодженні сталі 10ХФТБч коефіцієнт термічного розширення зростає в результаті часткового розпаду аустенітної складової на перліт (рис. 3, 4).

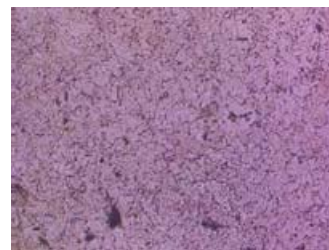
Водночас, коефіцієнт термічного розширення сталі 14X17H13KMБч повільно зменшується, а у сталі

10ХФТБч збільшується, тому кінцева різниця коефіцієнтів термічного розширення цих сталей різко збільшується. Коефіцієнт термічного розширення плакувального шару – сталі 03X17H3Г9МБДЮч змінюється подібно до коефіцієнту термічного розширення основи (сталі 14X17H13KMБч), а кінцева різниця їхніх коефіцієнтів термічного розширення не перевищує  $2 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ . Мікроструктурою сталей основи та плакувального шару біметалу є переважно аустеніт + карбіди (рис. 5). Твердість сталей (10ХФТБч+14X17H13KMБч) в зоні термічного впливу біметалу значно відрізняється: основа – 88 HRB, плакувальний шар – 72 HRB. В біметалі (03X17H3Г9МБДЮч+ 14X17H13KMБч), відповідно, 88 HRB та 90 HRB.

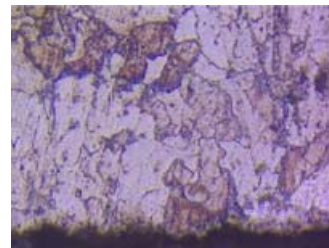


**Рисунок 3.** Дилатометричні криві залежності коефіцієнту термічного розширення досліджуваних сталей від температури нагріву та повільного охолодження:

1 – 14X17H13KMБч; 2 – 03X17H3Г9МБДЮч;  
3 – 10ХФТБч



a

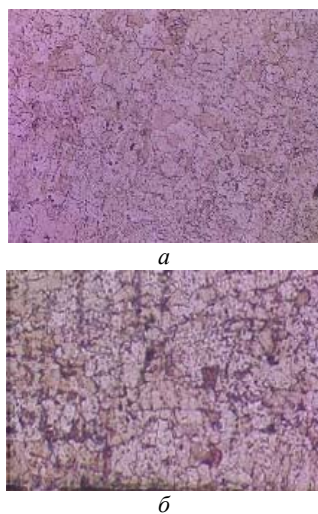


b

**Рисунок 4.** Мікроструктура сталей в зоні термічного впливу,  $\times 180$ : a – сталь 14X17H13KMБч;  
b – сталь 10ХФТБч



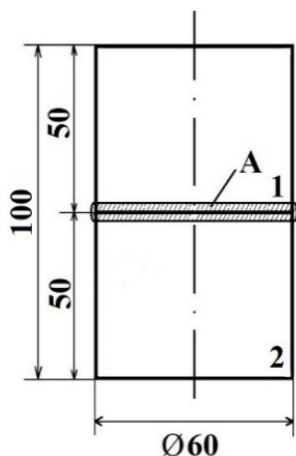
Заготовки різних сталей (плакувального шару + основи) зварювали у пакет для виготовлення біметалу методом плющення асиметричних пакетів при температурі 1000 °С і ступенем деформації  $\varepsilon = 50\%$  (рис. 6).



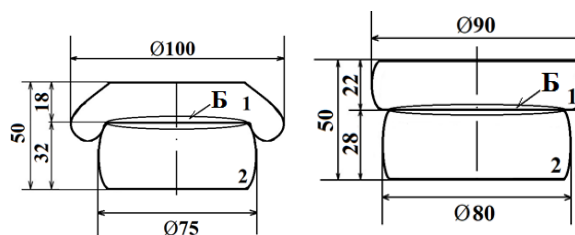
**Рисунок 5.** Мікроструктура в зоні термічного впливу,  $\times 180$ :  
 а – сталь 14X17H13KMБч; б – сталь 03X17H3Г9МБДЮч

Після деформації пакету (10ХФТБч+14Х17Н13КМБч) отримали біметалеву асиметричну заготовку з різними ступенями деформації плакувального шару та основи (рис. 7а).

Наступний пакет (03Х17Н3Г9МБДЮч+14Х17Н13КМБч) був майже симетричний із подібною структурою та фізико-механічними властивостями (рис. 7б). Зразки біметалу (03Х17Н3Г9МБДЮч+14Х17Н13КМБч), які піддавали випробуванням в процесі відновлення у реакторі показали задовільний результат. Після випробувань концентрація нікелю на поверхні металу (плакувального шару) залишилась незмінною, а його товщина до п'ятого циклу не змінювалась.



**Рисунок 6.** Схема зварного пакету для біметалу методом асиметричного плющення:  
 1 – плакувальний шар; 2 – основа



**Рисунок 7.** Біметалеві заготовки на основі сталі 14Х17Н13КМБч з плакувальними шарами з різних марок сталей: а – 10ХФТБч+14Х17Н13КМБч; б – 03Х17Н3Г9МБДЮч+14Х17Н13КМБч

### Висновки

1. Встановлено, що причиною жолоблення та тріщиноутворення біметалу (10ХФТБч+14Х17Н13КМБч) є значна різниця коефіцієнтів термічного розширення цих сталей в широкому інтервалі температур, що спричиняє напруження, які перевищують порогові значення міцності зварного з'єднання.

2. За результатами досліджень запропоновано використовувати біметал зі сталей 03Х17Н3Г9МБДЮч та 14Х17Н13КМБч, які мають близькі коефіцієнти термічного розширення і, водночас, низький вміст нікелю в плакувальному шарі, що забезпечує мінімальність його натікання у губчастий титан та граничну його концентрацію  $\leq 0,004\%$  мас.

### Список літератури

- Application and features of Titanium for the aerospace industry / Ikuhiro I., Yoshihisa S., Tsutomu T., Nozomu A. // Nippon steel & sumitomo metal technical report. – 2014. – No. 106.
- Обзор технологий производства титана / Червоный И. Ф. Д. А. Листопад, В. И. Иващенко, Р. Н. Воляр // Металургия. Збірник наукових праць ЗДІА. – Запоріжжя : ЗДІА, 2009. – № 19. – С. 24–28.
- Механизмы разрушения материалов реторт в магнетермическом производстве губчатого титана / Мищенко В. Г., Капитан А. В., Твердохлеб С.В., Лазечный И. Н. // Оборудование и технология термической обработки металлов и сплавов : сборник докладов 4-й Международной конференции. – Харьков : ННЦХФТИ, ИПЦ «Контраст», 2003. – С. 51–58.
- Листопад Д. А. Усовершенствование магнетермического процесса получения титана губчатого с целью снижения поступления примесей / Листопад Д. А. – ТАРП. – 3 (1(5)). – С. 13–14.
- Жаропрочная коррозионноустойчивая сталь : Евразийский патент. МПК С22С 38/58 (2006.01) / Мищенко В. Г., Савкин Д. В. – № 010206 ; заявл. 02.10.06; опубл. 30.06.08
- Тонконог Д. М. Дослідження корозійної тривкості жароміцних хромонікелевих сталей для авіадвигунобудування / Тонконог Д. М., Кріпак А. О. // Modern research in world science. Proceedings of the 6th International scientific and practical conference, SPC-Sci-conf.com.ua. – Lviv, Ukraine, – 2022. – P. 21–27.
- Мищенко В. Г. Развитие разрушения аппаратов восстановления и примеси в губчатом титане / Мищенко В. Г., Тонконог Д. М., Кріпак А. О. // Вісник двигунобудування. – 2004. – № 3 (6). – С. 135–137.

8. Формирование неоднородности структуры и фазового состава коррозионностойких сталей реакторов для производства губчатого титана после эксплуатации / Мищенко, В. Г., Снежной Г. В., Снежной В. Л., Савкин Д. В. // Титан. – 2009. – № 4 (26). – С. 10–13.

9. Спеціальні способи зварювання, за загальною редакцією академіка НАН України, доктора технічних наук, професора Б. Є. Патона / Кривцун, І. В., Квасницький В. В., Максимов, С. Ю., Єрмолаєв Г. В. – Миколаїв : НУК, 2017. – 346 с.

10. The changes of chrome-nikel-manganese steels phase terms properties in course of operational heating / Mishchenko V. G., Ievsieva V. N., Lazechnyy I. // Scientific Letters of Academic Society of Michal Baludansky. – 2014. – № 2 (1). – С. 89–94.

11. Кріпак А. О. Регресійний аналіз для отримання оптимального хімічного складу жароміцного сплаву / Кріпак А. О., Міщенко В. Г. : матеріали III Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Розвиток сучасної науки та освіти: реалії, проблеми якості, інновації» (30 вересня 2022). – Запоріжжя : ТДАТУ, 2022. – С. 153–156.

12. Кріпак А. О. Структура та механічні властивості аустенітних жароміцних сплавів різного функціонального призначення / Кріпак А. О. // XV Міжнародна науково-технічна конференція «Нові сталі та сплави і методи їх оброблення для підвищення надійності та довговічності виробів» (8 листопада 2022). – Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2022.

13. Кріпак А. О. Утворення спеціальних карбідів в жароміцній сталі на залізохромонікелевій основі / Кріпак А. О., Міщенко В. Г. // XXV Міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина і космос» (12–14 квітня 2023) Дніпро : Національний центр аерокосмічної освіти молоді ім. О. М. Макарова, 2023.

14. Mishchenko V. Determining the thermoplastic deformation mechanism of titanium reduction reactors and recommendations to increase the reactor service life / Mishchenko, V., Loskutov S., Kripak A. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2022. – 5 (7–119). – С. 14–20.

15. Тонконог Д. М. Розробка методу відновлення форми реактору у виробництві губчатого титану / Тонконог, Д. М., Міщенко В. Г. // Збірник наукових праць студентів, аспірантів і молодих вчених «Молода наука-2019» : у 5 т. – Запоріжжя, 2009. – С. 12–14.

Одержано 25.05.2023

## CREATION OF SPECIAL CONSTRUCTION MATERIAL USING THE ROLLING METHOD OF ASYMMETRICAL PACKAGES FOR DUAL-PURPOSE PRODUCTS

- Mishchenko V. Dr. Sc., Professor, professor of the department of integrated welding technologies and structural modeling, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: [mishchen4@gmail.com](mailto:mishchen4@gmail.com), ORCID: 0000-0003-0992-478X
- Byelikov S. Dr. Sc., Professor, professor of the automobile Department, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: [belikov@zp.edu.ua](mailto:belikov@zp.edu.ua), ORCID: 0000-0002-9510-8190
- Klimov O. PhD., Associate Professor, Dean of the Faculty of Engineering and Physics, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: [klimovo@zntu.edu.ua](mailto:klimovo@zntu.edu.ua), ORCID: 0000-0003-1248-6645
- Kripak A. Postgraduate student of the Department of General and Applied Physics, Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: [aliona127k@gmail.com](mailto:aliona127k@gmail.com), ORCID : 0000-0003-3415-1272
- Tonkonoh D. Postgraduate student of the Department of General and Applied Physics, Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: [tonkonohd@gmail.com](mailto:tonkonohd@gmail.com), ORCID: 0000-0003-2642-5333
- Kornienko V. Postgraduate student of the department of integrated welding technologies and structural modeling, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: [vkornienko268@gmail.com](mailto:vkornienko268@gmail.com), ORCID: 0009-0007-2193-3204
- Kharchenko A. Postgraduate student of the department of integrated welding technologies and structural modeling, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: [harchenko21@gmail.com](mailto:harchenko21@gmail.com), ORCID: 0009-0004-3378-6596

**Purpose.** The object of research in this work was the creation of a bimetallic material with increased mechanical and operational properties by rolling asymmetric packages. According to the preliminary results of the structure and properties research, the optimal compositions of the base and cladding layer of the bimetallic workpiece with the smallest difference in thermal expansion coefficients were selected. With the help of asymmetric rolling of base packages – steel 14X17H13КМБх + cladding layer-steel 03X17H3Г9МБДЮч, a bimetallic workpiece was made, which had low stresses in the welded seam and the zone of thermal influence, unlike the package 14X17H13КМБх + 10ХФТБх. Therefore, no grooving and thermal cracks were observed in the bimetal samples during the magneithermal production of spongy titanium. The inflow of nickel into spongy titanium from the surface of the plating layer during the recovery process did not exceed 0.004 % by mass. in the first five blocks of titanium since the beginning of operation.

**Research methods.** Metallographic, durometric, dilatometric.

**Results.** With the help of dilatometric research, the coefficients of thermal expansion of samples of base steels – 14X17H13KMБx, and steels of the cladding layer – 10XФТБx and 03X17H3Г9МБДЮч were obtained. As a result of research close to production conditions, a bimetallic workpiece was obtained, which is not subject to gouging, is crack-resistant and does not cause nickel to flow into the titanium sponge.

**Scientific novelty.** On the basis of experimental data, the development of destruction of the inner surface of the reactors of the magnetothermal process for the production of sponge titanium, which is subjected to temperature, mechanical load and periodic contact with titanium tetrachloride, liquid magnesium and magnesium chloride, which leads to grooving, the appearance of cracks in the reactor and the inflow of nickel into the titanium sponge, has been established. It is shown that in order to eliminate these undesirable phenomena, it is necessary to use a bimetallic material of different chemical composition with similar structure and physical and mechanical properties: coefficient of thermal expansion, hardness and strength limit.

**Practical value.** On the basis of research results, the chemical composition of the base – steel 14X17H13KMБч, cladding layer – steel 03X17H3Г9МБДЮч and the mode of hot deformation were developed, which made it possible to obtain the necessary structure, physico-mechanical and service properties.

**Key words:** asymmetric package, bimetallic workpiece, grooving, thermally affected zone, magnetothermal production of spongy titanium, plating layer, reactor, base steel.

## References

1. Ikuhiro I., Yoshihisa S., Tsutomu T., Nozomu A. (2014). Application and features of Titanium for the aerospace industry. Nippon steel & sumitomo metal technical report no. 106.
2. Chervonyj, I. F., Listopad D. A., Ivashenko V. I., Volyar R. N. (2009). Obzor tehnologij proizvodstva titana. Metalurgiya. Zbirnik naukovih prac ZDIA. Zaporizhzhya : ZDIA, 19, 24 – 28.
3. Mishhenko V. G., Kapitan A.V., Tverdohleб S. V., Lazechnyj I. N. (2003). Mehanizmy razrusheniya materialov retort v magnietermicheskom proizvodstve gubchatogo titana. Oborudovanie i tehnologija termicheskoy obrabotki metallov i splavov: Sbornik dokladov 4-j Mezhdunarodnoj konferencii. Har'kov: NNCHFTI, IPC "Kontrast", 51–58.
4. Listopad, D. A. (2012). Uovershenstvovanie magnie-termicheskogo processa polucheniya titana gubchatogo s celyu snizheniya postupleniya primesej. TARP. 2012, 3, (1(5)), 13–14.
5. Mishhenko V. G., Savkin D. V. (2008). Zharoprochnaya korroziionnostojkaya stal. Yevrazijskij patent. MPK S22S 38/58 (2006.01). № 010206 ; zayavl. 02.10.06 ; opubl. 30.06.08
6. Tonkonog, D. M., Kripak A. O. (2022). Doslidzhennya korozijnoyi triv-kosti zharomicnih hromonikelevih stalej dlya aviadvi-gunobuduvannya. Modern research in world science. Proceedings of the 6th International scientific and practical conference. SPC Sci-conf.com.ual. Lviv, Ukraine. 21–27.
7. Mishhenko V.G., Tverdohleб S.V., Omel'chenko O.S. (2004). Razvitie razrusheniya apparatov vosstanovleniya i primesi v gubchatom titane. Visnik dvigunobuduvannja. Naukovo-tehnichnij zhurnal. Zaporozh'ce: OAO "Motor Sich", 3 (6), 135–137.
8. Mishhenko V.G., Snezhnoj G.V., Snezhnoj V.L., Savkin D.V. (2009). Formirovanie neodnorodnosti struktury i fazovogo sostava korroziionnostojkih stalej reaktorov dlja proizvodstva gubchatogo titana posle jeksplyuatsii. Titan, 4 (26), 10–13.
9. Krivcun I. V., Kvasnickij, Maksimov S. Yu. Yermolayev G. V. (2017). Specialni sposoby zvaryuvannya. Za zagalnoyu redakciyeyu akademika NAN Ukraini, doktora tecnichnih nauk, profesora B. Ye. Patona. Mykolayiv: NUK, 346.
10. Mishchenko V., Ievsieva N., Lazechnyj I. (2014). The changes of chrome-nikel-manganese steels phase terms properties in course of operational heating. Scientific Letters of Academic Society of Michal Baludansky. 2, (1), 89–94.
11. Kripak, A. O., Mishhenko V. G. (2022). Regresijnij analiz dlya otrimannya optimalnogo himichnogo skladu zharo-micnogo splavu. Materiali III Mizhnarodnoyi naukovo-praktichnoyi internet-konferenciyi «Rozvitok suchasnoyi nauki ta osviti: realiyi, problemi yakosti, innovaciyi» (30 veresnya 2022). Zaporizhzhya : TDATU, 153–156.
12. Kripak, A. O. (2022). Struktura ta mehanichni vlasti-vosti austenitnih zharomicnih splaviv riznogo funkci-onalnogo priznachennya. XV Mizhnarodna naukovo-tehnichna konferenciya "Novi stali ta splavi i metodi yih obroblennya dlya pidvishennya nadijnosti ta dovgovichnosti virobiv" (8 listopada 2022). Zaporizhzhya: NU "Zaporizka politehnika".
13. Kripak A. O., Mishhenko V. G. (2023). Utvorennya specialnih karbidiv v zharomicnij stali na zalizohromonikelevij osnovi : XXV Mizhnarodna molodizhna naukovo-praktichna konferenciya «Lyudina i kosmos» (12–14 of April 2023). Dnipro: Naci-onalnij centr aekrokosmichnoyi osviti molodi im. O.M. Makarova.
14. Mishchenko V., Loskutov S., Kripak A. (2022). Determining the thermoplastic deformation mechanism of titanium reduction reactors and recommendations to increase the reactor service life. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5 (7–119), 14–20.
15. Tonkonog, D. M. (2019). Rozrobka metodu vidnovlennya formi reaktoru u virobniectvi gubchatogo titanu. Zbirnik naukovih prac studentiv, aspirantiv i molodih vchenih «Moloda nauka-2019» : u 5 t. / D. M. Tonkonog, V. G. Mishhenko // Zaporizkij nacionalnij universitet. Zaporizhzhya : ZNU, 1, 12–14.