

УДК 621.74

- Омельченко О.С. ст. викладач кафедри механіки Національного університету «Запорізька Політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: [omelchenko15@ukr.net](mailto:omelchenko15@ukr.net), ORCID 0000-0001-8925-4178
- Шалева Н.В. асистент кафедри механіки Національного університету «Запорізька Політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: [shaleva1711@ukr.net](mailto:shaleva1711@ukr.net), ORCID 0000-0002-6571-0359
- Єфанов В.С. доцент кафедри інтегровані технології зварювання та моделювання конструкцій Національного університету «Запорізька Політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: [vsyefanov@gmail.com](mailto:vsyefanov@gmail.com), ORCID 0000-0002-6363-4081

## ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ВПЛИВУ СУМІШІ ГАЗІВ НА ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ КАТОДІВ ДЛЯ ІОННО-ПЛАЗМОВОГО НАПИЛЕННЯ

**Мета роботи.** Удосконалення технологічних режимів виплавки катодів, що розплюються, на основі нікелю системи Ni-Cr-Al-Y з метою підвищення їх якості, а саме – зменшення загальної кількості дефектів у вигляді несплошностей, пор, непролаїв і підвищення гомогенності структури і хімічного складу та використання у якості захисної атмосфери інертних газів, найбільш розповсюдженими з яких є гелій та аргон.

**Методи дослідження.** Вдосконалено обладнання, зокрема, вакуумно-дуже установка була доукомплектована рампою і балоном з гелієм. Отримані пробні зразки у вигляді «шайб» (діаметром 127 мм і товщиною 40 мм), які використовувалися для дослідження мікроструктури і хімічного складу. Відпрацьовано режими переплаву. Дослідження хімічного складу проводили із застосуванням багатоцільового растрового електронного мікроскопа РЕМ 106I, оснащеного системою мікроаналізу.

**Отримані результати.** На підставі результатів досліджень впливу концентрації суміші газів на структуру та склад катодів встановлені технологічні режими плавлення, що дозволило поліпшити показники якості та економічні показники досліджуваних катодів. Це позитивно позначиться на кількості браку катодів, працездатності деталей, які містять покриття та ресурсу авіаційних двигунів в цілому.

**Наукова новизна.** Визначено залежність впливу концентрації суміші газів (аргон-гелій), що дозволило отримати оптимальне співвідношення захисних газів. При співвідношенні газів 70/30% отримані максимально якісні катоди, на яких проводили подальші дослідження.

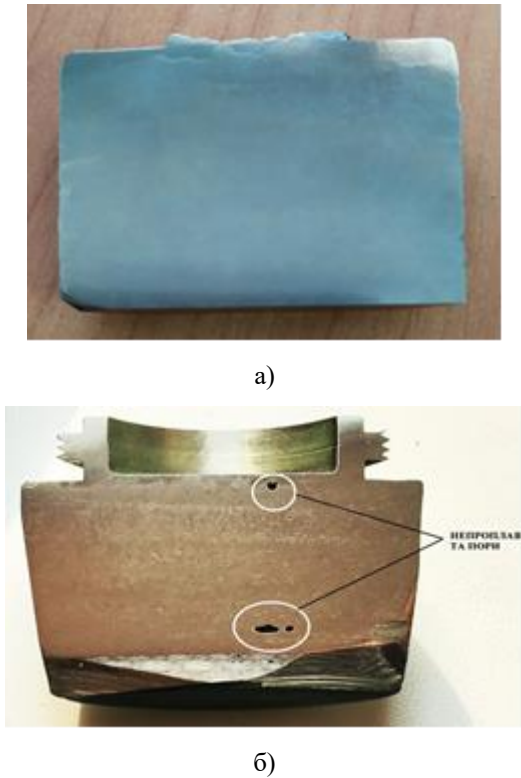
**Практична цінність.** Для забезпечення роботи при високих температурах застосовують жаростійкі покриття на основі нікелю. Якість нанесення покриттів визначається режимами нанесення і якістю самого катоду. Один з методів - пошарове плавлення катодів в мідному водоохолоджуваному кристалізаторі із застосуванням електрода, який плавиться та неплывиться. Запропоновано оптимальне співвідношення захисних газів для отримання якісних катодів

**Ключові слова:** нікелевий сплав, плавка, злиток, катод, структура, інертний газ, захисна атмосфера, аргон, гелій.

### Вступ

Сучасні енергетичні установки та авіадвигуни працюють при підвищених температурах, якщо в перших газотурбінних двигунах (ГТД) робочі температури матеріалу становили від 600 °С до 900 °С, то в подальшому значно підвищилися, досягнувши в даний час 1700 °С. Для забезпечення роботи при високих температурах застосовують жаростійкі покриття, зокрема, на основі нікелю. Ресурс лопаток в першу чергу залежить від якісних показників нанесених покриттів (відсутності пор, включень, хімічна однорідність). Як показано в роботах [2,3], якість нанесення покриттів визначається технологічними режимами і наявністю дефектів самого катоду. Як правило, катоди представляють собою механічно оброблені злитки сплавів зі спеціальною геометрією. Існує кілька технологій виготов-

лення катодів (метод традиційного лиття в кокіль, порошкова металургія, електрошлакове зварювання). Кожна з яких має свої переваги і недоліки. Основні складності цих технологій – нерівномірність розподілу хімічного складу та дефекти структури. Один з найбільш ефективних методів виготовлення катодів - пошарове плавлення катодів в мідному водоохолоджуваному кристалізаторі із застосуванням розплавляемого або електрода, який неплывиться. Останній метод забезпечує надійне перемішування легуючих та модифікуючих елементів за рахунок окремого плавлення з багаторазовим перемішуванням литих заготовок с подальшим їх сплавленням між собою в злиток. Однак, при пошаровому сплавленні литих заготовок між шарами можливо виникнення непролаїв, що призводить до дефектів катодів (Рис.1).



**Рисунок 1.** Макрошліфи катодів зі сплаву Ni - Cr - Al – Y:  
 а) якісний катод;  
 б) катод з основними дефектами.

**Аналіз досліджень та публікацій**

Технологія пошарового сплаву має ряд особливостей і вимагає відпрацювання технологічних режимів для забезпечення якісних показників катодів, формування правильної геометрії, сплавлених шарів, відсутність дефектів, таких як пори і непролави [4]. Вирішення цих проблем можливе шляхом зміни погонної енергії.

Найбільш простим і доступним шляхом вирішення даного завдання при дуговому зварюванні є збільшення швидкості плавлення електрода за рахунок підвищення зварювального струму. Однак, такий підхід має обмеження по можливостям обладнання, діаметру неплавкого електрода, використанню джерел живлення.

Отже, даний напрямок має суттєві обмеження у зварювальному струмі і області застосування [5].

Найбільш доцільним методом зміни геометрії проплавлення металу без принципових змін конструкції обладнання є застосування суміші інертних газів (аргон, гелій) замість однокомпонентних середовищ. Однак, це вимагає додаткових досліджень. Таким чином, отримання якісних злитків для катодів можливо при оптимізації технологічних параметрів плавки, а

саме додавання суміші газів аргон - гелій та визначення їх оптимальних співвідношень.

Згідно з дослідженнями [3...5] додавання гелію в аргон змінює теплофізичні властивості захисних газів, які впливають на технологічні властивості дуги і форму швів. Наприклад, у порівнянні з аргонем гелій має більш високий потенціал іонізації і велику теплопровідність при температурах плазми (Табл. 1).

**Таблиця 1 - Фізичні властивості газів, що застосовуються**

Параметр	Ar	He
Потенц. іонізації $U_i$ , eV	15,7	24,6
Коефіцієнт тепловкладення при 6000 К, Вт/(м.К)	0,17	1,5

**Мета роботи**

Підвищення якості катодів, на основі нікелю (Ni - Cr - Al - Y) шляхом удосконалення технологічних режимів виплавки злитків. Завдання - зменшення загальної кількості дефектів в злитках у вигляді несплошностей, пор, непролаво, підвищення гомогенності структури і хімічного складу.

**Матеріал і методика досліджень**

Для плавлення зразків була використана вакуумно-дугова піч ВД-1, яку було вдосконалено, а саме, додано рампу та балон гелію (1). Установка являє собою циліндричний корпус (2), встановлений на станині (3). У нижній частині знаходиться мідний кристалізатор (4), у верхній частині корпусу в кришці встановлений електродотримачі, а зліва – маніпулятор (6). Оглядове вікно (7) служить для спостереження і керування процесом плавки. Корпус, кристалізатор і електродотримачі охолоджуються водою. Справа корпус через вакуумний затвор (8) з'єднується з системою високого і низького вакуумування (9). При роботі з установкою здійснюється завантаження зразків в піч, відкачка вакууму насосом (10) та подача з балонів через рампу аргону і гелію в робочу камеру. Після зазначених операцій проводять процес плавки. Джерело живлення установки – зварювальний випрямляч ВДУ1200 (11) (Рис. 2).

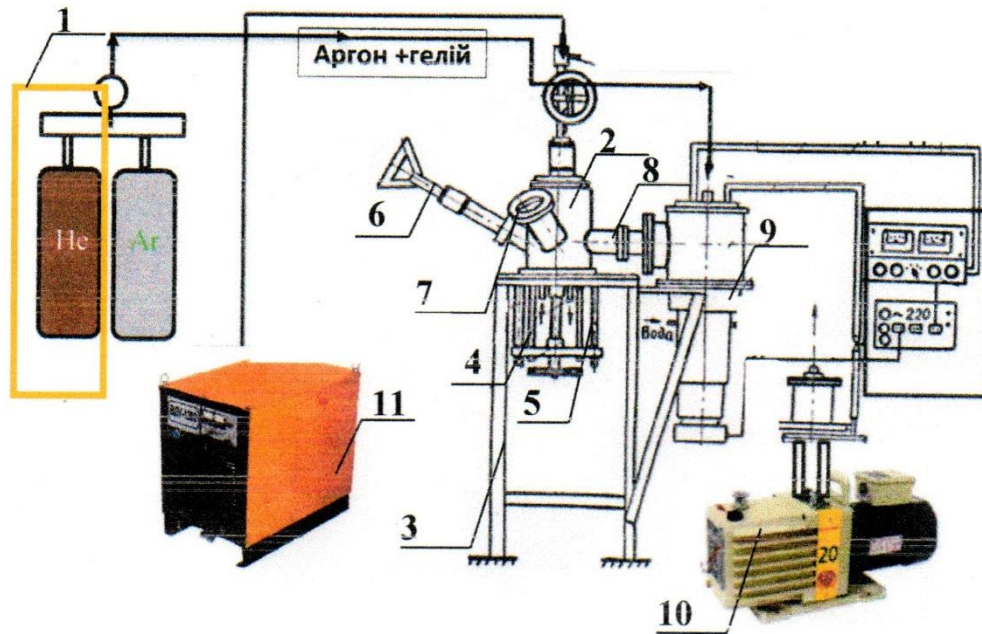


Рисунок 2. Схема електродугової установки для сплавлення злитків для катодів

Технологічні режими роботи обладнання для виплавки злитків включали: роботу насоса вакуумного бустерного паромасляного типу 2НВБМ-160 і вакуумного насоса типу АВЗ-20, які працювали 3 години на одну плавку; роботу насосів контролювали вакуумметром ВІТ 2-П.

Відпрацювання режимів переплавки проводилася шляхом експериментальної реалізації процесу. Діапазон режимів наступний:  $I = 450 - 1800 \text{ A}$ ,  $U = 30 - 45 \text{ V}$ ,  $\tau = 25 - 35 \text{ хв}$ , попереднє створення вакууму  $1 \times 10^{-4}$  мбар., робоче середовище - суміш газів  $\text{Ar} + \text{He}$ , тиск 0,5 бар, температура розплаву перед заливкою від  $1400^\circ\text{C} - 1700^\circ\text{C}$ .

Кожен злиток діаметром 50-70 мм висотою 5-7 мм переплавляють 3-5 разів при певних параметрах (Рис.3а). Після цього всі злитки завантажувалися в піч і пошарово наплавляли один на одного (в залежності від необхідних розмірів) при тих же параметрах. При цьому пошарово формується необхідна геометрія злитка, який застосовується для виготовлення катоду (Рис.3б). Досліджували злитки при різному процентному співвідношенні аргону і гелію (табл. 2). При співвідношенні 70/30% були отримані максимально якісні злитки, на яких проводили подальші дослідження (Рис. 3).



а)



б)

Рисунок 3. Злиток для досліджень:  
а) вихідний злиток для сплавлення заготовки катода;  
б) злиток для виготовлення катода.

Для відпрацювання технологічного режиму виплавки були отримані пробні зразки у вигляді «шайб» (діаметром 127 мм і товщиною 40 мм), які використовувалися для дослідження мікроструктури і хімічного складу.

Дослідження хімічного складу проводили із застосуванням багатоцільового растрового електронного мікроскопа РЕМ 106І, оснащеного системою мікроаналізу.

Металографічні дослідження отриманої структури злитка проводилося за допомогою оптичного і електронних мікроскопів. Зразки для металографічних досліджень виготовляли послідовним шліфуванням і поліруванням. Травлення шліфов проводили в реактиві складу: HF – 10 мл, HNO<sub>3</sub> – 25 мл, гліцерин – 65 мл. Мікроструктурний аналіз проводили з застосуванням інвертованого мікроскопа «Neophot-32». Енергодисперсійний аналіз проводили за допомогою багатоцільового растрового мікроскопу JSM-6360LA з інтегрованою системою мікроаналізу. Він дозволяє досліджувати хімічний склад локальних ділянок мікроструктури сплавів.

### Результати досліджень

Для визначення оптимальних режимів (суміші газів) які забезпечують кращі показники якості катодів, проводили пошарове сплавлення злитків при різних концентраціях газів (аргону та гелію) в їх суміші (табл. 1).

**Таблиця 2** - Результати досліджень на якість

Суміш захисних газів	Співвідношення у %	Результат перепау
Ar+ He	90+10	напливи
Ar+ He	80+20	виражені границі сплавлення
Ar+ He	70+30	відсутні напливи, межі сплавлення шарів розмиті

Для всебічної оцінки хімічного складу проводили дослідження в двох зонах фрагмента зразка. Для остаточного висновку, про відповідність дослідного сплаву вимогам, провели контрольну плавку з урахуванням раціональних режимів і коефіцієнтів переходу, які визначені експериментально. Хімічний склад сплаву злитка заготовки катода наведені в таблиці (табл. 3).

**Таблиця 3** - Хімічний склад сплаву, % мас

Вміст	Осн.	Легуючі елементи			Домішки	
	Ni	Cr	Al	Y	Si	Fe
%	67,52	20,40	12,25	0,55	0,11	0,20

+/-	0,10	0,30	0,20	0,05	0,05	0,05
-----	------	------	------	------	------	------

Результати дослідження хімічного складу, дозволяють зробити висновок про рівномірний розподіл хімічних речовин дослідного нікелевого сплаву. Таким чином, отримали злитки, які по концентрації хімічних елементів відповідають вимогам поставленого завдання.

На зразках, які вирізали з злітка заготовки катоду проводили дослідження макро- і мікроструктури. Макроструктура (мікроскоп МІТОМ-21) показала рівномірне і якісне сплавлення шарів катода, що підтверджує правильний підбір співвідношення інертних газів. Макрошліф злітка свідчить про повне його проплавлення, пори, включення і несплошності в ньому були відсутні. Дослідження мікроструктури показало рівномірність розподілу структурних складових, відсутність явно вираженої ліквіації. Аналіз металографічних досліджень показує дрібнодисперсну структуру, високу гомогенність злитків і відсутність дефектів. Аналіз результатів металографічних досліджень дозволяє встановити, що структура отриманого сплаву є дрібнодисперсною. Структурних неоднорідностей не виявлено.

Було встановлено, що додавання гелію в середу захисного газу аргону дозволить забезпечити більш концентровану дугу. Це дає можливість точно регулювати висоту наплавлення шарів. Це можна пояснити проникаючими властивостями дуги, при додаванні в якість захисного газу – гелію.

Візуальній огляд злитків, перепавлених у суміші 70 % Ar + 30 % He показав, що на боковій поверхні злитків відсутні напливи, межі сплавлення шарів металу розмиті, а структура бокової поверхні злитків близька до литої, внаслідок чого можна зробити висновок, що газова суміш 70 % Ar + 30 % He є оптимальна для дугового перепау сплаву заданого хімічного складу з точки зору отримання злитків без технологічних дефектів (напливи шарів один на інший, несплавлення шарів металу).

Для отриманих зразків характерна дрібнодисперсна, гомогенна структура з достатньою рівномірністю розподілу фаз по всьому об'єму злитків

Таким чином, впровадження нової розробки дозволило поліпшити показники якості досліджуваних злитків для катодів. За рахунок цього існує можливість скоротити кількість браку, що дозволяє прогнозувати підвищення якості катодів і у свою чергу збільшення захисних покриттів. Це позитивно позначиться на ресурсі і працездатності виробів, відповідальних деталей авіаційного призначення.

### Висновки

1. На підставі аналізу технології виробництва катодів на нікелевій основі для іонно-плазмових покриттів визначені шляхи підвищення якості катодів за рахунок зниження кількості пор і несплошностей та поліпшення структури злитків заготовок катодів.

2. Реалізована можливість виплавки катодів з використанням суміші газів (аргон+гелій) завдяки вдосконаленню конструкції установки вакуумно-дугової переплавки за рахунок додавання рампи і балона з гелієм.

3. Досліджено вплив складу суміші аргону гелію на структуру і хімічний склад злитків для катодів, оптимальні технологічні режими і якість катодів. Було встановлено, що додавання гелію в середовище захисного газу аргону дозволить забезпечити більш концентровану дугу, що дозволить точніше регулювати висоту наплавлення шарів. Встановлено, що концентрація газів 70%+30% забезпечує отримання сплаву заданого хімічного складу з точки зору отримання злитків без технологічних дефектів (напливів шарів один на інший, несплавлення шарів металу).

4. Підвищення якості катодів дає змогу зробити висновок про поліпшення показників якості покриттів та збільшення ресурсу роботи лопаток.

### Список літератури

1. Симс, Ч.Т. Суперсплавы II: Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок / Ч.Т. Симс - М.: Металлургия, 1995. - 384 с.
2. Масленков, С.Б. Справочник жаропрочных сталей и сплавов / С.Б. Масленков - М.: Металлургия, 1983. - 192 с.
3. Ефанов, В.С. Влияние технологии изготовления катодов на качество покрытий лопаток турбины / В.С. Ефанов, В.В. Ключихин, А.А. Педаш, В.Г. Шило // Вестник двигателестроения. - 2018. -№1. -С. 132 - 137.
4. Овчинников, А.В. Технология выплавки слитков для получения катодов из кобальтового сплава способом дугового переплава / А.В. Овчинников, С.М. Теслевич, Д.Л. Тизенберг, В.С. Ефанов // Современная электрометаллургия. -2019. -№1. -С. 23-27.
5. Патон, Б.Е. Электронно-лучевая плавка тугоплавких и высокореакционных металлов / Б.Е. Патон, Н.П. Тригуб, С.В. Ахонин - Киев: Наукова думка, 2008. - 312 с.
6. Асланян, И.Р. Современные тенденции развития технологии изготовления модельных композиций для литья жаропрочных сплавов [Текст] / И.Р. Асланян, О.Г. Оспенникова // Фундаментальные и приклад-

ные исследования в области создания литейных жаропрочных никелевых и интерметаллидных сплавов и высокоэффективных технологий изготовления деталей ГТД: научно-техническая конференция, 2017. –С. 49 – 58.

7. Горюнов, А.В. Современная технология получения литейных жаропрочных никелевых сплавов [Текст] / А.В. Горюнов, В.Е. Ригин // Авиационные материалы и технологии. – 2014. – №2. – С. 3 – 7.

8. Сидоров, В.В. Организация производства литых прутковых заготовок из современных литейных высокожаропрочных никелевых сплавов [Текст] / В.В. Сидоров, В.Е. Ригин, Д.Е. Каблов. // Литейное производство. – 2011. – №10. – С. 72 – 75.

9. Ночовная, Н.А. Исследование литейных характеристик жаропрочного интерметаллидного титанового сплава ВТИ-4 [Текст] / Н.А. Ночовная, А.С. Кочетков, К.А. Боков, В.И. Иванов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2017. №5.

10. Свечинский, В.Г. Сварка сталей в защитных газовых смесях на основе аргона в промышленности Украины [Текст] / В.Г. Свечинский, С.Т. Римский, В.И. Галинич //Автоматическая сварка. – 1994. – № 4. – С. 41 – 44.

11. Свечинский, В. Г. Оценка вязкости разрушения швов, сваренных в защитных газах и под флюсом [Текст] / В.Г. Свечинский, С.Т. Римский, В.И. Кирьян // Автоматическая сварка. – 1982. – № 8. – С. 46 – 49.

12. Патон, Б. Е. Управление процессом дуговой сварки путем программирования скорости подачи электродной проволоки [Текст] / Б.Е. Патон, Н.М. Воропай, В.Н. Бучинский // Автоматическая сварка. – 1977. – № 1. – С. 34 – 41.

13. Патон, Б. Е. Управление плавлением и переносом электродного металла при сварке в углекислом газе [Текст] / Б.Е. Патон, А.В.Лебедев // Автоматическая сварка. – 1988. – № 11. – С. 29 – 35.

14. Lucas, W. Choosing a shielding gas. Pt 2 [Текст] / Lucas W. // Weld. and Metal Fabr. – 1992. – № 6. – Р. 269 – 276.

15. Кайдалов, А. А. Эффективность применения защитных газовых смесей при дуговой сварке сталей [Текст] / А.А. Кайдалов, А.Н. Гаврик // Сварщик. – 2011. – № 4. – С. 28–31.

## DETERMINATION OF THE INFLUENCE OF THE MIXTURE OF GASES ON IMPROVING THE QUALITY OF CATHODES FOR ION-PLASMA SPUTTING

- Omelchenko O. Senior lecturer of the Department of Mechanics, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: [omelchenko15@ukr.net](mailto:omelchenko15@ukr.net), ORCID 0000-0001-8925-4178
- Shaleva N. Assistant lecturer of the Department of Mechanics, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: [shaleva1711@ukr.net](mailto:shaleva1711@ukr.net), ORCID 0000-0002-6571-0359
- Yefanov V. Cand. Sc., Associate Professor of the Department "Integrated technologies of welding and modeling of structures", National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: [vsyefanov@gmail.com](mailto:vsyefanov@gmail.com), ORCID 0000-0002-6363-4081

**Purpose.** Improvement of the technological modes of smelting sputtering cathodes based on nickel of the Ni-Cr-Al-Y system in order to improve their quality, namely, to reduce the total number of defects in the form of discontinuities, pores, non-melts and increase the homogeneity of the structure and chemical composition and use in qualities of the protective atmosphere of inert gases, the most widespread of which are helium and argon.

**Research methods.** The equipment was improved, in particular, the vacuum-arc installation was equipped with a ramp and a helium cylinder. Test samples in the form of "washers" (diameter 127 mm and thickness 40 mm) were obtained, which were used to study the microstructure and chemical composition. Remelting modes have been worked out. The study of the chemical composition was carried out using a multipurpose scanning electron microscope REM 106I, equipped with a microanalysis system.

**Results.** Based on the results of studies of the influence of the gas mixture concentration on the structure and composition of the cathodes, technological modes of melting were established, which made it possible to improve the quality indicators and economic indicators of the investigated cathodes. This will have a positive effect on the number of cathode failures, the performance of the parts that contain the coating and the life of aircraft engines in general.

**Scientific novelty.** The dependence of the influence of the concentration of the mixture of gases (argon-helium) was determined, which made it possible to obtain the optimal ratio of shielding gases. With a gas ratio of 70/30%, the highest quality cathodes were obtained, which were used for further research.

**Practical value.** Для забезпечення роботи при високих температурах застосовують жаростійкі покриття на основі нікелю. Якість нанесення покриттів визначається режимами нанесення і якістю самого катода. Один з методів - пошарове сплавлення катодів в мідному водоохолоджуваному кристалізаторі із застосуванням електроду, який плавиться та не плавиться. Запропоновано оптимальне співвідношення захисних газів для отримання якісних катодів.

**Key words:** nickel alloy, melt, ingot, cathode, structure, inert gas, protective atmosphere, argon, helium.

### References

1. Sims, Ch.T. (1995) Superalloys II: Heat-resistant materials for aerospace and industrial power installations. Metallurgy, 384.
2. Maslenkov, S.B. (1983) Handbook of heat-resistant steels and alloys. Metallurgy, 192.
3. Efanov, V.S., Klochikhin, A.A., Pedash, V.G. (2018) Effect of cathode manufacturing technology on the quality of coated turbine blades. Herald of dvizhtalestroeniya, 132 - 137.
4. Ovchinnikov, A.V., Teslevych, S.M., Tisenberg, D.L., Efanov, V.S. (2019) Ingot smelting technology for obtaining cobalt alloy cathodes by arc remelting. Modern electrometallurgy, 23-27.
5. Paton, B.E., Trygub, N.P., Akhonyn, S.V. (2008) Electron-beam melting of refractory and high-reaction metals. Kyiv: Naukova dumka, 312.
6. Aslanyan, I.R., Ospennikova, O.G. (2017) Modern trends in the development of the technology of manufacturing model compositions for the casting of heat-resistant alloys. Fundamental and applied research in the area of creation of cast heat-resistant nickel and intermetallic alloys and high-efficiency technologies for the production of gas turbine parts: scientific and technical conference, 49-58.
7. Horyunov, A.V., Rygin, V.E. (2014) Modern technology of obtaining cast heat-resistant nickel alloys. Aviation materials and technologies, 3 - 7.
8. Sidorov, V.V., Rygin, V.E., Kablov, D. E. (2011) Organization of the production of cast bar blanks from modern cast high-heat-resistant nickel alloys. Foundry production, 10, 72 - 75.

9. Nochovnaya, N.A., Kochetkov, A.S., Bokov, K.A., Ivanov, V.I. (2017) Study of casting characteristics of heat-resistant intermetallic titanium alloy VTI-4. Trudy VIAM: electron. scientific and technical journal, 5.
10. Svetsinsky, V.G., Rimsky, S.T., Halynych, V.I. (1994) Welding of steels in protective gas mixtures based on argon in the industry of Ukraine. Automatic conflict, 4, 41 – 44.
11. Svetsinsky, V.G., Rimsky, S.T., Kiryan, V.I. (1982) Estimation of the viscosity of destruction of seams welded in protective gases and under flux. Automatic quarrel, 8, 46 - 49.
12. Paton, B. E., Voropai, N.M., Buchinsky, V.N. (1977) Controlling the process of arc welding by programming the speed of the electrode wire supply, 1, 34 – 41.
13. Paton, B.E., Lebedev, A.V. (1988) Control of melting and transfer of electrode metal during welding in carbon dioxide, 11, 29 – 35.
14. Lucas, W. (1992) Choosing a shielding gas. Pt 2. Weld. and Metal Fabr, 6, 269 – 276.
15. Kaidalov, A. A., Gavryk, A.N. (2011) Effectiveness of application of protective gas mixtures in arc welding of steels, Welder, 4, 28–31.