

УДК 621.74

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.010920.52.654

РОЗРОБКА СКЛАДУ РОБОЧОЇ СУМІШІ ГАЗІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ КАТОДІВ НА ОСНОВІ НІКЕЛЮ ДЛЯ ІОННО-ПЛАЗМОВОГО НАПИЛЕННЯ

ЄФАНОВ В. С.¹, *аспір.*,
ШЕВЧЕНКО В. Г.^{2*}, *канд. техн. наук, доц.*,
ШАЛЕВА Н. В.³, *асист.*,
ОМЕЛЬЧЕНКО О. С.⁴, *ст. виклад.*,
ОМЕЛЬЧЕНКО В. А.⁵

¹ Кафедра обладнання та технології зварювального виробництва, Національний університет «Запорізька Політехніка», вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (066) 637-48-34, e-mail: vsyefanov@gmail.com

^{2*} Кафедра механіки, Національний університет «Запорізька Політехніка», вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (095) 312-14-76, e-mail: shaleva1711@ukr.net

³ Кафедра механіки, Національний університет «Запорізька Політехніка», вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (066) 027-65-80, e-mail: shaleva1711@ukr.net

⁴ Кафедра механіки, Національний університет «Запорізька Політехніка», вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (095) 434-77-31, e-mail: omelchenko15@ukr.net

⁵ Кафедра механіки, Національний університет «Запорізька Політехніка», вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (095) 434-77-31, e-mail: omelchenko15@ukr.net

Анотація. Постановка проблеми. Сучасні енергетичні установки та авіадвигуни працюють за підвищених температур. Якщо в перших газотурбінних двигунах (ГТД) робочі температури матеріалу становили від 600 до 900 °С, то в подальшому значно підвищилися, досягнувши наразі 1 700 °С. Для забезпечення роботи за високих температур застосовують жаростійкі покриття на основі нікелю. Ресурс лопаток у першу чергу залежить від якісних показників нанесених покриттів (рівномірності, відсутності пор, включень, хімічної однорідності). Якість нанесення покриттів визначається режимами нанесення і якістю самого катода. Як правило, катоди являють собою сплави, що наносяться зі спеціальною геометрією. Існує кілька технологій виготовлення катодів, кожна з яких має свої переваги і недоліки. Один із методів – пошарове формування сплавом зливків для виготовлення катодів у мідному водоохолоджуваному кристалізаторі із застосуванням електрода, що плавиться. **Мета дослідження** – підвищення якості катодів на основі нікелю (Ni – Cr – Al – Y) шляхом удосконалення технологічних режимів виплавки зливків. Завдання – зменшення загальної кількості дефектів у зливках у вигляді несущільностей, пор, непроплавів, підвищення гомогенності структури і хімічного складу. **Методика.** Вдосконалено обладнання, зокрема, вакуумно-дугова установка була доукомплектована рампою і балоном із 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 106І, оснащеного системою мікроаналізу. **Наукова новизна.** Визначено залежність впливу концентрації суміші газів (аргон – гелій), що дозволило отримати оптимальне співвідношення захисних газів. При співвідношенні газів 70/30 % отримано максимально якісні катоди, на яких проводили подальші дослідження. **Висновки.** На підставі результатів досліджень впливу концентрації суміші газів на структуру та склад катодів встановлено технологічні режими плавлення, що дозволило поліпшити показники якості та економічні показники досліджуваних катодів. Це зменшить кількість браку катодів, поліпшить працездатність деталей з покриттями та ресурс авіаційних двигунів у цілому.

Ключові слова: нікелевий сплав; плавка; зливки; катод; структура; інертний газ; захисна атмосфера; аргон; гелій

РАЗРАБОТКА СОСТАВА РАБОЧЕЙ СМЕСИ ГАЗОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА КАТОДОВ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ ДЛЯ ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ

ЕФАНОВ В. С.¹, *аспір.*,
ШЕВЧЕНКО В. Г.^{2*}, *канд. техн. наук, доц.*,

ШАЛЕВА Н. В.³, *ассист.*,
ОМЕЛЬЧЕНКО О. С.⁴, *ст. препод.*,
ОМЕЛЬЧЕНКО В. А.⁵

¹ Кафедра оборудования и технологии сварочного производства, Национальный университет «Запорожская Политехника», ул. Жуковского, 64, 69063, Запорожье, Украина, тел. +38 (066) 637-48-34, e-mail: vsyefanov@gmail.com

^{2*} Кафедра механики, Национальный университет «Запорожская Политехника», ул. Жуковского, 64, 69063, Запорожье, Украина, тел. +38 (095) 312-14-76, e-mail: shaleva1711@ukr.net

³ Кафедра механики, Национальный университет «Запорожская Политехника», ул. Жуковского, 64, 69063, Запорожье, Украина, тел. +38 (066) 027-65-80, e-mail: shaleva1711@ukr.net

⁴ Кафедра механики, Национальный университет «Запорожская Политехника», ул. Жуковского, 64, 69063, Запорожье, Украина, тел. +38 (095) 434-77-31, e-mail: omelchenko15@ukr.net

⁵ Кафедра механики, Национальный университет «Запорожская Политехника», ул. Жуковского, 64, 69063, Запорожье, Украина, тел. +38 (095) 434-77-31, e-mail: omelchenko15@ukr.net

Аннотация. Постановка проблемы. Современные энергетические установки и авиадвигатели работают при повышенных температурах. Если в первых газотурбинных двигателях (ГТД) рабочая температура материала составляла от 600 до 900 °С, то в последующем значительно увеличилась, достигнув в данное время 1 700 °С. Для обеспечения работы при высоких температурах применяют жаростойкие покрытия на основе никеля. Ресурс лопаток в первую очередь зависит от качественных показателей нанесенных покрытий (равномерности, отсутствия пор, включений, химической однородности). Качество нанесения покрытий определяется режимами нанесения и качеством самого катода. Как правило, катоды представляют собой сплавы, которые наносятся со специальной геометрией. Существует несколько технологий изготовления катодов, каждая из которых имеет свои преимущества и недостатки. Один из методов – послойное сплавление слитков для изготовления катодов в медном водоохлаждаемом кристаллизаторе с применением неплавящегося электрода. **Цель исследования** – повышение качества катодов на основе никеля (Ni – Cr – Al – Y) путем усовершенствования технологических режимов выплавки слитков. Задача – уменьшение общего количества дефектов в слитках в виде несплошностей, пор, непроплавов, повышение гомогенности структуры и химического состава. **Методика.** Усовершенствовано оборудование, в частности, вакуумно-дуговая установка, за счет доукомплектации рампой и баллоном с гелием. Получены пробные образцы в виде «шайб» (диаметром 127 мм и толщиной 40 мм), которые использовались для исследования микроструктуры и химического состава. Отработаны режимы переплава. Исследования химического состава проводили с применением многоцелевого растрового электронного микроскопа РЕМ 106I, оснащенного системой микроанализа. **Научная новизна.** Определена зависимость влияния концентрации газов (аргон – гелий) на качественные показатели слитков для заготовок катодов. При соотношении газов 70/30 % получены наиболее качественные слитки для катодов. **Выводы.** На основании результатов исследований влияния концентрации смеси газов на структуру и состав катодов установлены технологические режимы плавления, что позволило улучшить показатели качества и экономические показатели исследуемых катодов. Это уменьшит количество брака катодов, улучшит работоспособность деталей, которые содержат покрытия, и ресурс авиационных двигателей в целом.

Ключевые слова: никелевый сплав; плавка; слиток; катод; структура; инертный газ; защитная атмосфера; аргон; гелий

DEVELOPMENT OF GAS MIXTURE COMPOSITION FOR THE IMPROVEMENT OF NICKEL-BASED CATHODES FOR THE IONIC-PLASMA COATING

YEFANOV V.S.¹, *Postgrad. Stud.*,
SHEVCHENKO V.G.^{2*}, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
SHALEVA N.V.³, *Assist.*,
OMELCHENKO O.S.⁴, *Assist. Prof.*,
OMELCHENKO V.A.⁵

¹ Department of Welding Technology and Equipment, Zaporizhzhia Polytechnic National University, 64, Zhukovskiy Str., 69063, Zaporizhzhia, Ukraine, tel. +38 (066) 637-48-34, e-mail: vsyefanov@gmail.com

^{2*} Department of Mechanics, Zaporizhzhia Polytechnic National University, 64, Zhukovskiy Str., 69063, Zaporizhzhia, Ukraine, tel. +38 (095) 312-14-76, e-mail: shaleva1711@ukr.net

³ Department of Mechanics, Zaporizhzhia Polytechnic National University, 64, Zhukovskiy Str., 69063, Zaporizhzhia, Ukraine, tel. +38 (066) 027-65-80, e-mail: shaleva1711@ukr.net

⁴ Department of Mechanics, Zaporizhzhia Polytechnic National University, 64, Zhukovskiy Str., 69063, Zaporizhzhia, Ukraine, tel. +38 (095) 434-77-31, e-mail: omelchenko15@ukr.net

⁵ Department of Mechanics, Zaporizhzhia Polytechnic National University, 64, Zhukovskiy Str., 69063, Zaporizhzhia, Ukraine, tel. +38 (095) 434-77-31, e-mail: omelchenko15@ukr.net

Abstract. Modern power plants and aero-engines work at enhanceable temperatures that may reach over 1 700 °C. Heat-resistant coatings on the basis of nickel are applied to provide the work at high temperatures. The service life of shoulder-blades, first of all, depends on the quality factors of the coatings (evenness, absence of pores, inclusions, chemical homogeneity). Quality of coating is determined by the application process and quality of cathode. As a rule, cathodes are alloys that are spread with the special geometry. There are a few technologies of making cathodes, with their advantages and defects. One of the methods is ingot melting layer by layer to produce cathodes in copper water-cooled mold with the use of unfluxible electrode. **Purpose of research.** To enhance the quality of nickel-based cathodes (Ni – Cr – Al – Y) by the improvement of technological modes of ingot melting. The tasks are set to reduce defects such as pores, to increase homogeneity of structure and chemical composition. **Methodology.** The equipment, namely vacuum arc unit, was improved with helium cylinder. Test samples in a way of "pucks" (127 mm in diameter and 40-mm thick) were obtained to study the microstructure and chemical composition. The modes of remelting are worked through. Research of chemical composition was conducted with the use of SEM of PEM 106I equipped with microanalysis system. **Scientific novelty.** Optimal correlation of protective gases on ingot quality factors for further cathode production was identified. At gas correlation of 70/30 % high quality ingots were obtained. **Conclusions.** Based on the results of research on the effect of the concentration of gas mixture on the structure and composition of cathodes, technological melting conditions were established, which made it possible to improve the quality indicators and economic indicators of the studied cathodes. This will positively affect the number of cathode defects, serviceability of parts that contain coatings and the service life of aircraft engines in general.

Keywords: *cathode; nickeliferous alloy; melting; bar; structure; rare gas; protective atmosphere; argon; helium*

Вступ. Сучасні енергетичні установки та авіадвигуни працюють за підвищених температур. Якщо в перших газотурбінних двигунах (ГТД) робочі температури матеріалу становили від 600 до 900 °C, то в подальшому значно підвищилися, досягнувши наразі 1 700 °C. Для забезпечення роботи за високих температур застосовують жаростійкі покриття, зокрема, на основі нікелю. Ресурс лопаток у першу чергу залежить від якісних показників нанесених покриттів (відсутність пор, включень, хімічна однорідність).

Як показано у працях [2; 3], якість нанесення покриттів визначається технологічними режимами і наявністю дефектів самого катода. Як правило, катоди являють собою механічно оброблені зливки сплавів зі спеціальною геометрією. Існує кілька технологій виготовлення катодів (метод традиційного лиття в кокіль, порошкова металургія, електрошлакове зварювання), кожна з яких має свої переваги і недоліки. Основні складності цих технологій – рівномірність розподілу хімічного складу та дефекти структури зливок для заготовок катодів.

Один із найефективніших методів виготовлення катодів – пошарове

сплавлення зливок у мідному водоохолоджуваному кристалізаторі із застосуванням розплавлюваного або електрода, який не плавиться. Останній метод забезпечує надійне перемішування легувальних та модифікувальних елементів за рахунок окремого плавлення з багаторазовим перемішуванням литих заготовок із подальшим їх сплавленням між собою в зливку. Однак за пошарового сплавлення литих заготовок між шарами можливе виникнення непроплавів, що викликає дефекти катодів (рис. 1).

У той же час технологія пошарового сплаву має низку особливостей і вимагає відпрацювання технологічних режимів для забезпечення якісних показників зливок для заготовок катодів, формування правильної геометрії, сплавлених шарів, відсутність дефектів, таких як пори і непроплави [4]. Вирішення цих проблем можливе шляхом зміни погонної енергії. Найбільш простий і доступний шлях вирішення цього питання за дугового зварювання – збільшення погонної енергії плавлення електрода за рахунок підвищення зварювального струму. Однак такий підхід має обмеження в можливостях обладнання, діаметрі

неплавкого електрода, використанні джерел живлення.

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

Найдоцільніший метод зміни геометрії проплавлення металу без принципових змін конструкції обладнання – застосування суміші інертних газів (аргон, гелій) замість однокомпонентних середовищ. Однак це вимагає додаткових досліджень.

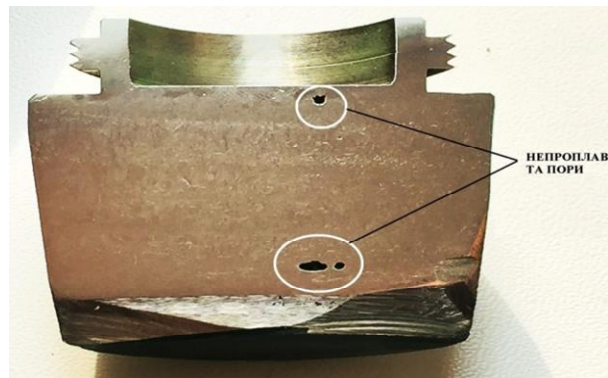
Таким чином, отримання якісних зливків для катодів можливе у разі

оптимізації технологічних параметрів плавки, а саме додавання суміші газів аргон – гелій та визначення їх оптимального співвідношення.

Згідно з дослідженнями [3–5], додавання гелію в аргон змінює теплофізичні властивості захисних газів, які впливають на технологічні властивості дуги і форму швів. Наприклад, порівняно з аргоном гелій має більш високий потенціал іонізації і велику теплопровідність за температури дуги до 6 000 °K (табл. 1).



а



б

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

Таблиця 1

Фізичні властивості застосовуваних газів

Параметр	Ar	He
Потенціал іонізації U_i , eV	15,7	24,6
Коефіцієнт тепловкладення за 6 000 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 зливків. Завдання – зменшення загальної кількості дефектів у зливках у вигляді несущільностей, пор, непроплавів, підвищення гомогенності структури і хімічного складу для заготовок катодів.

Методика. Для плавлення зразків використано вакуумно-дугову піч ВД-1, яку було вдосконалено, а саме, додано рампу та балон гелію (1). Установка являє собою циліндричний корпус (2), установлений на станині (3). У нижній частині міститься

мідний кристалізатор (4), у верхній частині корпуса в кришці встановлений електродотримач, а зліва – маніпулятор (6). Оглядове вікно (7) призначене для спостереження за процесом плавлення. Корпус, кристалізатор і електродотримачі охолоджуються водою. Корпус через вакуумний затвор (8) з'єднується із системою високого і низького вакуумування (9–11).

Під час роботи з установкою здійснюється завантаження зразків у піч, відкачування вакууму насосами (9, 10) та подача з балонів через рампу (1) аргону і гелію в робочу камеру (2). Після зазначених операцій проводять процес плавлення. Джерело живлення установки –

зварювальний випрямлювач ВДУ1200 (12) (рис. 2).

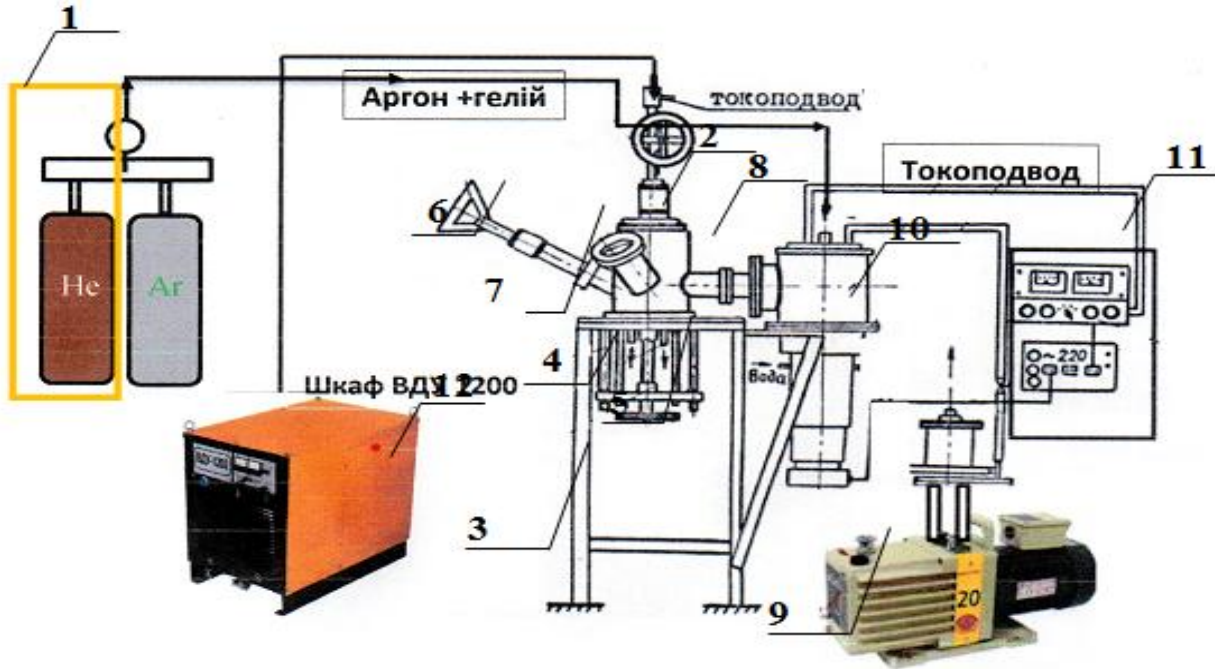


Рис. 2. Схема електродугової установки для сплавлення злитків для катодів

Технологічний процес виплавлення зливків починається з роботи насоса вакуумного бустерного паромасляного типу 2НВБМ-160 (рис. 2, поз. 9) і вакуумного насоса типу АВЗ-20 (рис. 2, поз. 10), які працювали 3 год. на одну плавку. Роботу насосів контролювали вакуумметром ВІТ 2-П (рис. 2, поз. 11).

Відпрацювання режимів переплавлення проводилося шляхом експериментальної реалізації процесу. Діапазон режимів такий: $I = 450 \dots 1800 \text{ А}$, $U = 30 \dots 45 \text{ В}$, $\tau = 25 \dots 35 \text{ хв}$, попередній вакуум 1×10^{-4} мбар., робоче середовище – суміш газів $\text{Ar} + \text{He}$, тиск 0,5 бар.

Кожен зливкок діаметром 50...70 мм висотою 5...7 мм переплавляли 3...5 разів за певних параметрів (рис. 3, а). Після цього всі зливки завантажували в піч і пошарово наплавляли один на одного (залежно від необхідних розмірів) за тих же параметрів. При цьому пошарово формується необхідна геометрія зливка, який застосовується для виготовлення катода (рис. 3, б). Досліджували зливки за різного процентного співвідношення аргону і гелію (табл. 2).

Для відпрацювання технологічного режиму виплавки отримано пробні зразки у

вигляді «шайб» діаметром 127 мм і товщиною 40 мм, які використовували для дослідження мікроструктури і хімічного складу.

Дослідження хімічного складу проводили із застосуванням багатоцільового растрового електронного мікроскопа РЕМ 106І, оснащеного системою мікроаналізу. За співвідношення 70/30 % отримано максимально якісні зливки, на яких проводили подальші дослідження (рис. 3).

Металографічні дослідження отриманої структури зливка проводили за допомогою оптичного й електронних мікроскопів. Зразки для металографічних досліджень виготовляли послідовним шліфуванням і поліруванням. Травлення шліфів проводили в реактиві складу: $\text{HF} - 10 \text{ мл}$, $\text{HNO}_3 - 25 \text{ мл}$, гліцерин – 65 мл. Мікроструктурний аналіз виконували із застосуванням інвертованого мікроскопа «Neophot-32». Енергодисперсійний аналіз – за допомогою багатоцільового растрового мікроскопа JSM-6360LA з інтегрованою системою мікроаналізу. Він дозволяє досліджувати хімічний склад локальних ділянок мікроструктури сплавів.

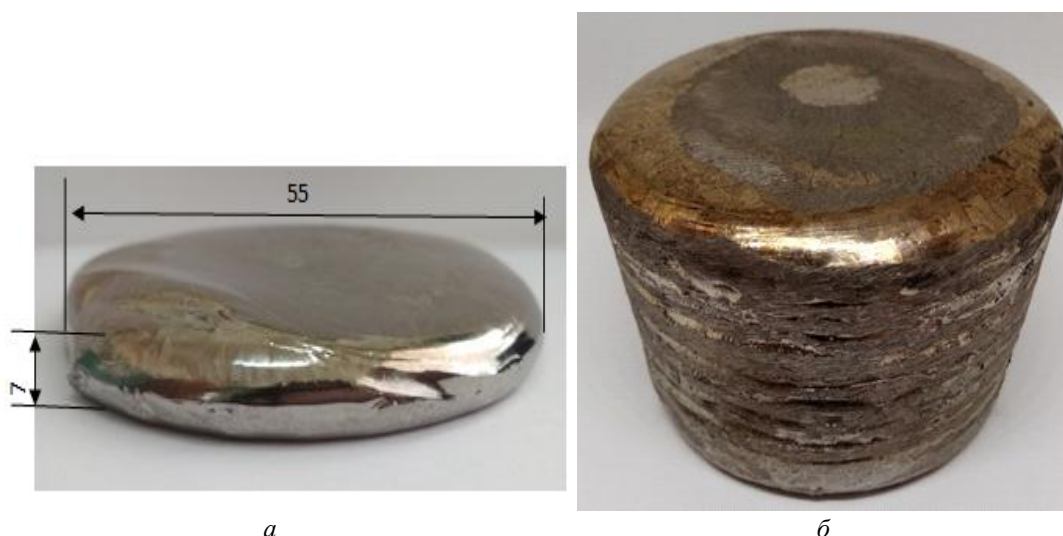


Рис. 3. Зливки для досліджень:

а – вихідний зливки для сплавлення заготовки катода; б – зливки для виготовлення катода

Результати досліджень. Для визначення оптимальних режимів (суміші газів), які забезпечують кращі показники якості катодів, проводили пошарове сплавлення зливок за різних концентрацій газів (аргону та гелію) в їх суміші (табл. 2).

Таблиця 2

Результати досліджень впливу концентрації газів на якість зливок

Суміш захисних газів	Співвідношення у %	Глибина проплавлення, мм	Результат переплавлення
Ar + He	90+10	менше 1	поверхневі напливи, непролави, пори
Ar + He	80+20	менше 1	виражені межі сплавлення
Ar + He	70+30	1...2	відсутні напливи, межі сплавлення шарів розмиті
Ar + He	60+40	3...4	відсутні напливи, межі сплавлення шарів розмиті
Ar + He	50+50	4...5	відсутні напливи, межі сплавлення шарів розмиті

На зразках, які вирізали зі зливки заготовки катода, проводили дослідження макро- і мікроструктури. Макроструктура (мікроскоп МІТОМ-21) показала рівномірне і якісне сплавлення шарів катода, що підтверджує правильний підбір співвідношення інертних газів.

Результати дослідження дозволили встановити, що за концентрацій газів до 30 % гелію були непролави, при цьому глибина проплавлення становила менше 1 мм. За концентрації газів 30 і більше – непролави відсутні і зона проплавлення 3..5 мм (рис. 4). Зроблено висновок, що концентрація газів 70/30 – оптимальна.

Макрошліф зливки свідчить про повне його проплавлення, пори, включення і несучільності в ньому були відсутні. Дослідження мікроструктури показало рівномірність розподілу структурних складових, відсутність явно вираженої ліквідації.

Аналіз результатів металографічних досліджень дозволяє встановити, що структура отриманого сплаву дрібнодисперсна. Структурних неоднорідностей не виявлено. Демонструє дрібнодисперсну структуру, високу гомогенність зливок і відсутність дефектів (рис. 4).

Установлено, що додавання гелію в середовище захисного газу аргону дозволить забезпечити більш концентровану дугу, що дає можливість точно регулювати висоту

наплавлення шарів. Це можна пояснити проникними властивостями дуги, за додавання як захисного газу гелію.

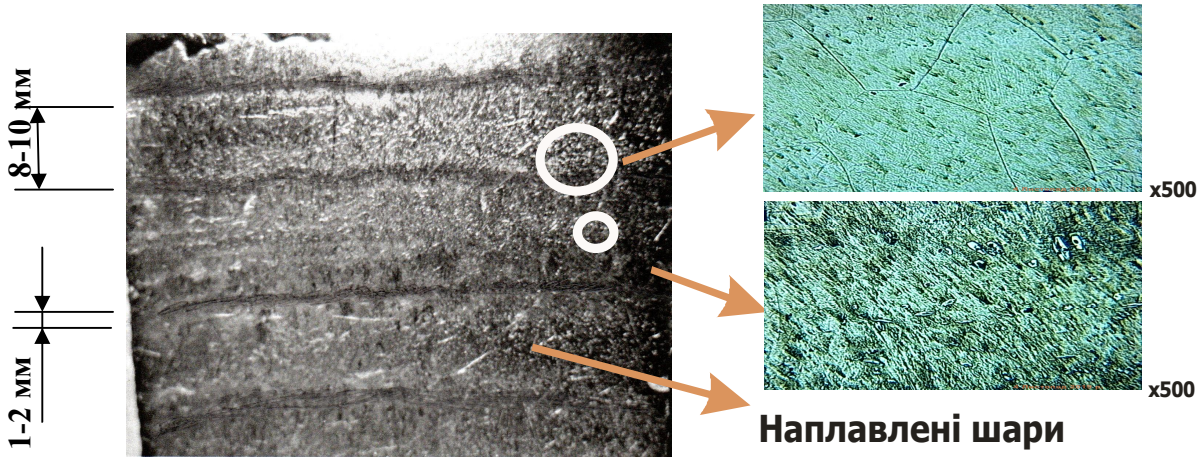


Рис. 4. Макро- та мікроструктури зон сплавлення зливок за використання суміші газів 70 /30 Ar – He

Візуальний огляд зливок, переплавлених у суміші 70 % Ar + 30 % He, показав, що на бічній поверхні зливок відсутні напливи, межі сплавлення шарів металу розмиті, а структура бічної поверхні зливок близька до литої, внаслідок чого

можна зробити висновок, що газова суміш 70 % Ar + 30 % He оптимальна для дугового переплавлення сплаву заданого хімічного складу з точки зору отримання зливок без технологічних дефектів (напливів шарів один на інший, несплавлення шарів металу).

Таблиця 3

Середній хімічний склад зразків із п'яти плавів, визначених спектральним методом, масова частка, %

Елемент	Зона 1		Елемент	Зона 2	
	%	+/-		%	+/-
Ni	67,48	0,10	Ni	67,53	0,10
Cr	19,10	0,30	Cr	18,90	0,30
Al	10,80	0,20	Al	10,90	0,20
Y	0,40	0,05	Y	0,4	0,05
Si	0,12	0,05	Si	0,11	0,05
S	0,10	0,01	S	0,12	0,01
Fe	0,21	0,05	Fe	0,20	0,05

Для всебічного оцінювання хімічного складу проводили дослідження у 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.

Дослідження проводили у поперечному перерізі зливка у п'яти точках. Середнє значення хімічного складу та відхилення концентрацій легувальних елементів та

домішок наведені в таблиці 3. Результати дослідження хімічного складу дозволяють зробити висновок про рівномірний розподіл хімічних елементів досліджуваного нікелевого сплаву. Таким чином, отримали зливки, які за концентрацією хімічних елементів відповідають вимогам поставленого завдання.

Для отриманих зразків характерна дрібнодисперсна, гомогенна структура з достатньою рівномірністю розподілу фаз по

всьому об'єму зливків.

Таким чином, упровадження нової розробки дозволило поліпшити показники якості досліджуваних злитків для катодів. Завдяки цьому існує можливість скоротити кількість браку, що дозволяє прогнозувати підвищення якості катодів і, у свою чергу, зміцнення 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 визначено шляхи підвищення якості катодів за рахунок зниження кількості пор і несучільностей та поліпшення структури зливків заготовок катодів.

2. Реалізовано можливість виплавки катодів із 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 і гелію на структуру, хімічний склад зливків для катодів, технологічні режими і якість катодів. Установлено, що додавання гелію в середовище захисного газу аргону дозволяє забезпечити більш концентровану дугу, що допомагає точніше регулювати висоту наплавлення шарів. Доведено, що співвідношення газів 70 % Ar + 30 % He забезпечує отримання сплаву заданого хімічного складу та зливків без технологічних дефектів (напливів шарів один на інший, несплавлення шарів металу).

4. Підвищення якості катодів дозволяє зробити висновок про поліпшення показників якості покриттів та збільшення ресурсу відповідальних деталей авіаційних двигунів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Симс Ч. Т. Суперсплавы II: Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок. Москва : Metallurgiya, 1995. 384 с.
2. Масленков С. Б. Справочник жаропрочных сталей и сплавов. Москва : Metallurgiya, 1983. 192 с.
3. Ефанов В. С., Ключихин В. В., Педаш А. А., Шило В. Г. Влияние технологии изготовления катодов на качество покрытий лопаток турбины. *Вестник двигателестроения*. 2018. № 1. С. 132–137.
4. Овчинников А. В., Теслевич С. М., Тизенберг Д. Л., Ефанов В. С. Технология выплавки слитков для получения катодов из кобальтового сплава способом дугового переплава. *Современная электрометаллургия*. 2019. № 1. С. 23–27.
5. Патон Б. Е., Тригуб Н. П., Ахонин С. В. Электронно-лучевая плавка тугоплавких и высокорреакционных металлов. Киев : Наукова думка, 2008. 312 с.

REFERENCES

1. Sims C.T. *Supersplavy II: Zharoprochnyye materialy dlya aerokosmicheskikh i promyshlennykh energoustanovok* [Super alloys II: Heatproof materials for aerospace and industrial energy options]. Moscow : Metallurgy, 1995, 384 p. (in Russian).
2. Maslenkov S.B. *Spravochnik zharoprochnykh staley i splavov* [Directory of heat-resistant steels and alloys]. Moscow : Metallurgy, 1983, 192 p. (in Russian).
3. Yefanov V., Klotchihin V., Pedash A. and Shylo V. *Vliyaniye tekhnologii izgotovleniya katodov na kachestvo pokrytiy lopatok turbiny* [Influence of technology of making of cathodes on quality of coverages of shoulder-blades of turbine]. *Vestnik dvigatelestroyeniya* [Engine Bulletin]. 2018, no. 1, pp. 132–137. (in Russian).
4. Ovchinnikov A.V., Teslevich S.M., Tithenberg D.L. and Yefanov V.S. *Tekhnologiya vyplavki slitkov dlya polucheniya katodov iz kobal'tovogo splava sposobom dugovogo pereplava* [Technology of smelting of bars for the receipt of cathodes from a cobalt alloy the method of arc remelt]. *Sovremennaya elektrometallurgia* [Modern electrometallurgy]. 2019, no. 1, pp. 23–27. (in Russian).
5. Paton B.E., Tryhub N.P. and Akhonyan S.V. *Elektronno-luchevaya plavka tugoplavkikh i vysokoreaktsionnykh metallov* [Cathode-ray melting of refractory and high-reactionary metals]. Kyiv : Naukova Dumka Publ., 2008, 312 p. (in Russian).

Надійшла до редакції: 27.06.2020.