

УДК 621.74

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.250619.45.321

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВЫПЛАВКИ СЛИТКОВ ИЗ НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА МЕТОДОМ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО ПЕРЕПЛАВА

ЕФАНОВ В. С.¹, *аспир.*,
ОВЧИННИКОВ А. В.², *д. т. н., проф.*,
ДЖУГАН А. А.^{3*}, *ассист.*,
ТКАЧЕНКО С. Н.⁴, *к. т. н.*,
ЖДАН В. С.⁵, *аспир.*

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

² Кафедра оборудования и технологии сварочного производства, Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, 69063, Запорожье, Украина, тел. +38(066) 637-48-34, e-mail: vsyefanov@gmail.com

^{3*} Кафедра физического материаловедения, Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, 69063, Запорожье, Украина, тел. +38 (050) 076-75-34, e-mail: o.a.dzугan@gmail.com

⁴ Кафедра оборудования и технологии сварочного производства, Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, 69063, Запорожье, Украина, тел. +38 (066) 637-48-34, e-mail: vsyefanov@gmail.com

⁵ Запорожская государственная инженерная академия, пр. Соборный, 226, 69006, Запорожье, Украина

Аннотация. *Цель исследования* – усовершенствование технологических режимов выплавки распыляемых катодов на основе никеля системы Ni–Cr–Al–Y с целью повышения их качества, а именно – уменьшение общего количества дефектов в виде несплошностей, пор, непроплавов, и повышения однородности структуры и химического состава. *Методика.* Для приготовления шихты под переплав исходные материалы измельчались до необходимого размера и тщательно перемешивались, что позволяло обеспечить равномерное распределение легирующих элементов во всем объеме шихты. Для получения опытных слитков использовали вакуумно-дуговую гарнисажную печь. Масса загрузки шихты на одну плавку составляла 4 000...6 000 г. Обработка режимов переплава проводилась путем экспериментальной реализации процесса. Диапазон режимов следующий: $I = 450...1\ 800\text{A}$, $U = 30...45\text{V}$, $\tau = 25...35\text{ мин.}$, предварительное создание вакуума $1 \cdot 10^{-4}$ мбар, рабочая среда – смесь газов Ag/He (70/30), давление 0,5 бар, температура подогрева кокиля 250...800 °С, температура расплава перед заливкой 1 400...1 700 °С. Для всесторонней оценки химического состава проводили исследование в двух зонах фрагмента слитка, в центральной части образца и на его поверхности. Исследования химического состава проводили с применением многоцелевого растрового электронного микроскопа РЭМ 1061, оснащенного системой микроанализа. Металлографические исследования полученной структуры слитка проводилось с помощью оптического и электронного микроскопов. *Результаты.* Установлено, что использование вакуумно-дугового переплава для получения сплавов на основе никеля с использованием приемов приготовления шихты различной дисперсности и уточнением параметров технологического процесса плавки позволяют получать слитки с минимальным количеством характерных дефектов, с образованием однородной структуры и с равномерным распределением легирующих элементов во всем объеме сплава. *Научная новизна.* Установлены закономерности влияния технологических параметров подготовки шихты и процесса плавки на структуру и свойства жаропрочных сплавов на никелевой основе. *Практическая значимость.* Практическое использование полученных результатов позволит значительно повысить однородность и однородность слитков при производстве катодов для нанесения покрытий, что, в свою очередь, положительно скажется на качестве наносимых покрытий и общем ресурсе деталей.

Ключевые слова: шихта; легирующий элемент; никелевый сплав; плавка; слиток; структура; свойства

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИПЛАВКИ ЗЛИВКІВ З НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ МЕТОДОМ ВАКУУМНО-ДУГОВОЇ ПЕРЕПЛАВКИ

ЕФАНОВ В. С.¹, *аспир.*,
ОВЧИННИКОВ О. В.², *д. т. н., проф.*,
ДЖУГАН О. А.^{3*}, *асист.*,
ТКАЧЕНКО С. М.⁴, *к. т. н.*,
ЖДАН В. С.⁵, *аспир.*

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

² Кафедра обладнання та технології зварювального виробництва, Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (066) 637-48-34, e-mail: vsyefanov@gmail.com

^{3*} Кафедра фізичного матеріалознавства, Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38(050) 076-75-34, e-mail: o.a.dzugan@gmail.com

⁴ Кафедра обладнання та технології зварювального виробництва, Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (066) 637-48-34, e-mail: vsyefanov@gmail.com

⁵ Запорізька державна інженерна академія, пр. Соборний, 226, 69006, Запоріжжя, Україна

Анотація. *Мета дослідження* – удосконалення технологічних режимів виплавки катодів на основі нікелю системи Ni–Cr–Al–Y для підвищення їх якості, а саме – зменшення загальної кількості дефектів у вигляді несутцільностей, пор, непроплавів і підвищення гомогенності структури та хімічного складу. *Методика.* Для приготування шихти під переплавку вихідні матеріали подрібнювалися до необхідного розміру та ретельно перемішувалися, що дозволяло забезпечити рівномірний розподіл легуючих елементів у всьому об'ємі шихти. Для отримання дослідних зливків використовували вакуумно-дугову гарнісажну піч. Маса завантаження шихти на одну плавку становила 4 000...6 000 г. Відпрацювання режимів переплавки проводилося шляхом експериментальної реалізації процесу. Діапазон режимів такий: I = 450...1 800 А, U = 30...45 В, τ = 25...35 хв, попередньо створювався вакуум 1·10⁻⁴ мбар, робоче середовище – суміш газів Ag/He (70/30), тиск 0,5 бар, температура підігріву кокілю 250...800 °С, температура розплаву перед заливанням 1 400...1 700 °С. Для всебічного оцінювання хімічного складу проводили дослідження в двох зонах фрагменту відливка, в центральній частині зразка та на його поверхні. Досліджували хімічний склад із застосуванням багатоцільового растрового електронного мікроскопу РЕМ 106I, оснащеного системою мікроаналізу. Металографічні дослідження отриманої структури зливка проводилися за допомогою оптичного й електронного мікроскопів. *Результати.* Встановлено, що використання вакуумно-дугової переплавки для отримання сплавів на основі нікелю із застосуванням прийомів приготування шихти різної дисперсності і уточнення параметрів технологічного процесу плавки дозволяє отримувати зливки з мінімальною кількістю характерних дефектів, з утворенням однорідної структури і з рівномірним розподілом легуючих елементів у всьому об'ємі сплаву. *Наукова новизна.* Встановлено закономірності впливу технологічних параметрів підготовки шихти і процесу плавлення на структуру і властивості жароміцних сплавів на нікелевій основі. *Практичне значення.* Практичне використання отриманих результатів дозволить значно підвищити гомогенність і однорідність зливків у виробництві катодів для нанесення покриттів, що, у свою чергу, позитивно позначиться на якості покриттів та загальному ресурсі деталей.

Ключові слова: шихта; легуючий елемент; нікелевий сплав; плавка; відливка; структура; властивості

IMPROVEMENT OF THE TECHNOLOGY OF MELTING INGOTS OF NICKEL BASED ALLOYS BY VACUUM ARC REMELTING (VAR)

YEFANOV V.S.¹, *Postgraduate Student*,
OVCHYNNYKOV O.V.², *Dr. Sc. (Tech.), Professor*,
DZHUHAN O.A.^{3*}, *Assistant*,
TKACHENKO S.M.⁴, *Ph. D.*,
ZHDAN V.S.⁵, *Postgraduate Student*

¹ Department of welding technology and equipment, Zaporizhia National Technical University, Zhukovskoho str., 64, 69063, Zaporizhzhya, Ukraine, tel. +38 (066) 637-48-34, e-mail: vsyefanov@gmail.com

² Department of welding technology and equipment, Zaporizhia National Technical University, Zhukovskoho str., 64, 69063, Zaporizhia, Ukraine, tel. +38 (066) 637-48-34, e-mail: vsyefanov@gmail.com

^{3*} Department of physical materials science, Zaporizhia National Technical University, Zhukovskoho str., 64, 69063, Zaporizhia, Ukraine, tel. +38(050) 076-75-34, e-mail: o.a.dzugan@gmail.com

⁴ Department of welding technology and equipment, Zaporizhia National Technical University, Zhukovskoho str., 64, 69063, Zaporizhia, Ukraine, tel. +38 (066) 637-48-34, e-mail: vsyefanov@gmail.com

⁵ Zaporizhia State Engineering Academy, 226, Sobornyi Ave., 69006, Zaporizhia, Ukraine

Abstract. *Purpose.* Improvement of the technological modes for the melting of nickel-based cathodes of composition Ni–Cr–Al–Y in order to improve their quality, namely, reducing the total number of defects in the form of discontinuities, pores, non-melts and increasing the homogeneity of the structure and chemical composition. *Methods.* To prepare the smelting charge for melting, the raw materials were chopped to the required size and mixed, which made it possible to ensure uniform distribution of the alloying elements in the entire volume of the smelting charge. To obtain experimental ingots, a vacuum-arc furnace was used. The mass of smelting-charge loading per melting was 4 000...6 000 g. Testing of melting modes was carried out by experimental implementation of the process. The range of modes is as follows: I = 450...1 800A, U = 30...45 V, τ = 25...35 min, preliminary creation of a vacuum of 1·10⁻⁴ mbar. The operating fluid is Ag/He gas mixture (70/30), pressure 0.5 bar, temperature of chill mold heating – 250...800 °С, melt temperature before pouring – 1 400...1 700 °С. For a comprehensive assessment of the chemical composition, a study was conducted in two zones of ingot fragment, in the central part of the sample and on its surface. The chemical

composition studies were performed using a multipurpose scanning electron microscope REM 1061 equipped with a microanalysis system. Metallographic studies of the obtained structure of the ingot were carried out using optical and electronic microscopes. **Results.** It has been established that the use of vacuum-arc remelting process to produce nickel-based alloys using preparation methods of smelting-charge with various size and refining the melting process parameters allows to produce ingots with a minimum number of proper defects, with the formation of a uniform structure and uniform distribution of alloying elements in the entire alloy. **Scientific novelty.** The regularities of the influence of the technological parameters of the charge preparation and the melting process on the structure and properties of nickel-based superalloys are established. **Practical significance.** Practical use of the obtained results will significantly improve the homogeneity of ingots in the production of cathodes for coating, which in turn will have a positive effect on the quality of applied coatings and the total resource of parts.

Keywords: smelting charge; alloying element; nickel alloy; metal melting; ingot; structure; properties

Введение

Проблемы обеспечения надежности, долговечности и ресурса работы газовых турбин наиболее сложные среди многочисленных проблем, возникающих на пути развития современного авиационного двигателестроения.

В ряде случаев на ответственные детали, работающие в условиях высокотемпературной коррозии, наносят покрытия из никелевого сплава, повышая тем самым их ресурс работоспособности в несколько раз [1–3].

Никелевые сплавы получили широкое применение в машиностроении благодаря способности никеля образовывать твердые растворы со многими металлами, высокой коррозионной стойкости в газовых и жидких средах, отсутствию аллотропических превращений [4–6].

Также следует отметить, что свойства никелевых сплавов в значительной мере зависят от технологии их изготовления [7–10].

К наиболее эффективным и распространенным жаростойким покрытиям относятся покрытия на основе алюминидов никеля, высокие защитные свойства которых обеспечиваются их способностью окисляться с образованием плёнки Al_2O_3 . Долговечность таких покрытий лимитируется содержанием алюминия в поверхностном слое, а также наличием модификаторов, обеспечивающих стабилизацию его содержания на уровне, необходимом для формирования пленки Al_2O_3 [5; 6].

Наиболее широкое распространение при изготовлении заготовок никелевых сплавов имеет метод традиционного литья в кокиль. При этом существует высокая вероятность образования характерных для данной технологии внутренних дефектов, таких как поры, рыхлоты, ликвационные явления и, как следствие, существенно снижающих качество получаемых заготовок.

Вторым по очередности, но не менее распространенным методом изготовления никелевых сплавов является порошковая металлургия (ПМ). Технологическая схема при изготовлении изделий методами ПМ включает операции подготовки шихтовых материалов, их компактирование и последующее спекание. Качество таких заготовок в большинстве случаев зависит от качества исходного сырья – порошков и подготовки шихты, что требует больших экономических затрат. Еще одна проблема – сложность получения однородной структуры

заявленного сплава. Поэтому целесообразно рассмотреть другие технологии и методы изготовления этих сплавов, таких как вакуумно-дуговой переплав (ВДП).

Применение метода ВДП позволяет обеспечить высокую скорость кристаллизации слитков с мелкодисперсной гомогенной бездефектной структурой [2], а также улучшить качество получаемых заготовок в целом и соответственно качество получаемых из них деталей и покрытий.

Цель работы – повышение качества распыляемого катода с никелевого сплава системы Ni–Cr–Al–Y путем совершенствования технологии его выплавки.

Состояние вопроса

Применяемые в настоящее время трубные катоды на установках типа МАП имеют достаточно много дефектов, вызванных особенностью технологии их производства. Зачастую дефекты катодов (рис. 1) проявляются уже в процессе нанесения покрытия и, как следствие, приводят к появлению дефектов на самих лопатках. Возникшие дефекты покрытия на лопатках трудно устранить.

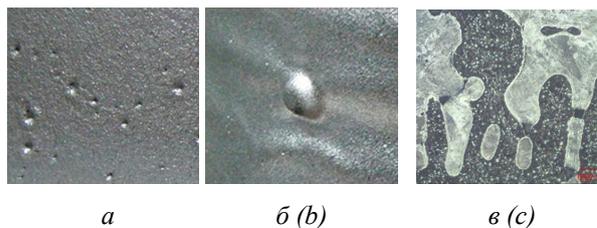


Рис. 1. Дефекты возникающие при изготовлении катодов на основе никеля:

a – поры, несплошности; б – непролавы, в – неоднородность структуры / Fig. 1. Defects arising in the manufacture of nickel-based cathodes: a – pores, discontinuities; b – non-melts, c – heterogeneity of structure

Основные дефекты при изготовлении катодов:

- пористость;
- неравномерность распределения химических элементов;
- неоднородность структуры.

Необходимость изготовления сплавов на основе никеля требует сбалансированного подбора состава и оптимального количества химических элементов в

зависимости от требуемых свойств.

Введение алюминия и хрома в никелевые сплавы повышает их жаростойкость (до 1250 °С) и позволяет расширить применение сплавов в условиях повышенных температур и агрессивных сред. Например, соединения редкоземельных элементов, прежде всего иттрия, который активно образует в сплаве, из-за наибольшего сродства к азоту, водороду и кислороду, соответствующие нитриды, гидриды и оксиды в виде наноразмерных включений, повышают микротвердость и другие свойства материала.

Для сокращения количества дефектов и повышения качества нанесения покрытия требуется рассмотрение различных технологий изготовления катодов и сравнение качества получаемого покрытия.

Таким образом, обеспечение необходимых характеристик зависит от состава и структуры слитка. Это, в свою очередь, обуславливает необходимость использования сложных многокомпонентных систем легирования, а также комплексов модифицирующих элементов в сплавах. Эффективность их действия зависит от равномерности распределения по объему слитка, что влияет на гомогенность структуры катодов и, в конечном итоге, – на качество покрытий. Одним из определяющих факторов равномерного распределения легирующих и модифицирующих элементов является их начальное состояние в материалах шихты и способ выплавки. Одни из наиболее распространенных считаются методы выплавки:

- электронно-лучевой переплав (ЭЛП);
- вакуумно-дуговой переплав (ВДП).

К преимуществам процесса дугового переплава можно отнести возможность ведения процесса плавки с использованием плавящихся и неплавящихся электродов, что дает возможность использовать разные технологические приемы. Также к преимуществам процесса можно отнести: а) возможность за одну плавку получать слитки от нескольких грамм до тонн; б) получать гомогенные слитки за один переплав; в) возможность вести процесс как в вакууме, так и в среде инертных газов; г) возможность использовать разнофракционную шихту [4]. Методы ВДП позволяют использовать шихтовой материал в широком диапазоне исходных размеров, даже порошки.

Целесообразно рассмотреть применение технологии изготовления катодов из никелевого сплава системы Ni–Cr–Al–Y методом ВДП с целью уменьшения количества характерных дефектов и повышения качества конечной продукции.

Результаты проведенных работ

Разработка сплава на основе никеля предусматривала получение предварительно заданного химического состава (табл. 1). Для изготовления слитков при плавке можно использовать сырье в виде порошков или чушек. Согласно анализу химического состава, для

выплавки опытного сплава использовали следующие материалы: алюминий первичный (min 99,9 %) ГОСТ 11069-2001; иттрий металлический (99,5 %) ТУ 48-4-208-72; никель катодный Н1У ГОСТ 849-97; хром металлический Х99Н1 ГОСТ 5905-2004.

Таблица 1

Химический состав сплава СДП-2 / Chemical composition of alloy СДП-2

Сплав	Химический состав				
	Основные компоненты, мас. доля, %				
	Ni	Cr	Al	Y	Примеси
СДП-2	Осн	18...22	11...13	0,3...0,6	≤ 1,5

Выплавку опытного сплава выполняли на вакуумно-дуговой гарнисажной печи ВДГП с кристаллизацией в графитовом кокиле (рис. 2).

Перед началом работ исходные материалы предварительно измельчали до нужного размера, перемешивали и шихтовали (табл. 2).

Для отработки технологического режима выплавки были получены пробные образцы в виде «шайб» (диаметром 127 мм и толщиной 40 мм), которые использовались для исследования микроструктуры и химического состава.

Таблица 2

Химический состав шихтовых материалов / Chemical composition of smelting charge

Химический состав, мас. доля, %			
Ni	Cr	Al	Y
67,55	20,00	12,00	0,45

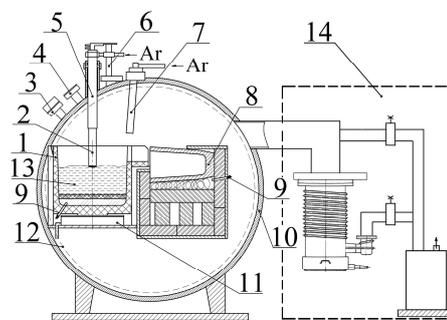


Рис. 2. Схема установки ВДГП: 1 – тигель; 2 – неплавящийся электрод; 3 – смотровое окно с видеорегистрированием; 4 – смотровое окно; 5 – плазматрон; 6 – привод перемещения; 7 – подведение аргона; 8 – кокиль; 9 – термонара; 10 – плавильная камера; 11 – анод; 12 – поворотное устройство; 13 – гарнисаж; 14 – вакуумная система / Fig. 2. WDGP installation diagram: 1 – crucible; 2 – non-consumable electrode; 3 – viewing window with video registration; 4 – viewing window; 5 – plasma torch; 6 – movement drive; 7 – argon supply; 8 – chill; 9 – thermocouple; 10 – melting chamber; 11 – anode; 12 – turntable; 13 – skull; 14 – vacuum system

Внешний вид слитка после механической обработки приведен на рисунке 3.

Технологические режимы работы оборудования для выплавки слитков включали: работу насоса вакуумного бустерного паромасляного типа 2НВБМ-160 и форвакуумного насоса типа АВЗ-20, которые работали 3 часа на одну плавку; работу насосов контролировали вакуумметром ВИТ 2-П.

Отработка режимов переплава проводилась путем экспериментальной реализации процесса. Диапазон режимов следующий: $I = 450...1\ 800\ A$, $U = 30...45\ V$, $\tau = 25...35\ \text{мин.}$, предварительное создание вакуума $1 \cdot 10^{-4}$ мбар, рабочая среда – смесь газов Ag/He (70/30), давление 0,5 бар, температура подогрева кокиля 250...800 °С, температура расплава перед заливкой 1 400...1 700 °С.

Для всесторонней оценки химического состава проводили исследование в двух зонах фрагмента слитка (рис. 3).

К первой зоне отнесли торцевую плоскость слитка, ко второй – поверхности слитка, полученные при разрезании. Исследования проводили в центре соответствующих зон.

Исследования химического состава проводили с применением многоцелевого растрового электронного микроскопа РЭМ 106I, оснащенного системой микроанализа.



Рис. 3. Характерный вид опытного слитка /
Fig. 3. The characteristic type of an experienced ingot

Содержание иттрия определяли энергодисперсионным рентгено – спектральным методом.

Металлографические исследования полученной структуры слитка проводились с помощью оптического и электронного микроскопов. Образцы для металлографических исследований изготавливали последовательным шлифованием и полированием. Травление шлифов проводили в реактиве состава:

$HF - 10\ \text{мл}$, $HNO_3 - 25\ \text{мл}$, глицерин – 65 мл. Микроструктурный анализ проводили с применением инвертированного микроскопа «Neophot-32». В таблице 3 приведены результаты исследования химического состава опытных плавок.

Металлографическими исследованиями установлено, что в структуре сплавов нет структурной неоднородности. Присутствует зона с измененной структурой, что является следствием значительного уменьшения скорости кристаллизации сплава в результате подогревания кокиля. Таким

образом, отмеченная зона является следствием технологической неточности при плавке.

Таблица 3

**Результаты измерения химического состава образцов из пяти плавок, определенных спектральным методом /
Results of measuring of chemical composition of standards from five melting certain a spectral method**

Элемент	Зона 1		Элемент	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

Сравнение таблиц 2 и 3 позволило установить, что химический состав слитка не отвечал требованиям поставленной задачи, поэтому было выполнено уточнение коэффициентов перехода и корректировка состава шихты.

Для установления коэффициентов перехода компонентов шихты при выплавке проводили сравнение химического состава, который регламентировался при расчете шихты и химического состава, фактически полученного по средним значениями таблицы 3. Сравнение данных таблиц 2 и 3 позволяет рассчитать коэффициенты перехода элементов лигатуры. Результаты расчета приведены в таблице 4.

Таблица 4

**Коэффициенты перехода элементов шихты /
Coefficients of transition of elements of charge**

Элемент	Ni	Cr	Al	Y
Коэф. перехода элемента	0,99	0,95	0,90	0,67

Таким образом, из анализа данных таблицы 4 следует, что для обеспечения необходимой концентрации химических элементов в составе сплава необходимо корректировать состав шихты с учетом коэффициентов перехода.

Для окончательного вывода о соответствии опытного сплава требованиям задания провели контрольную плавку с учетом рациональных режимов и коэффициентов перехода, которые определены экспериментально.

Химический состав полученного опытного слитка отвечал требованиям задания (табл. 5).

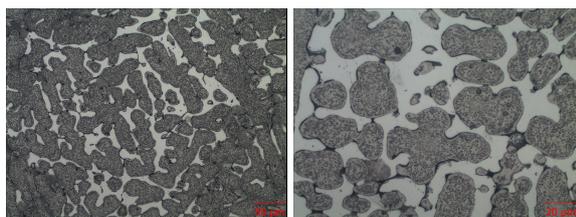
Анализ результатов металлографических исследований позволяет установить, что структура полученного сплава является мелкодисперсной. Структурных неоднородности не обнаружено. Результаты исследований структуры приведены на рисунке 4.

Таблиця 5

Химический состав опытного сплава, мас., % / Chemical composition of an experience alloy, mas. %

Кол-во	Легирующие элементы				Примеси	
	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

Анализ полученных результатов, позволяет сделать вывод о равномерном распределении химических элементов опытного никелевого сплава.



а (×200)

б (b) (×500)

Рис. 4. Структура сплава, полученная на электронном микроскопе под различным увеличением / Fig. 4. The structure of the alloy obtained by an electron microscope under different magnification

Также в ходе исследования были получены карты распределения (рис. 5) алюминия, хрома, иттрия и никеля. Большая интенсивность цвета на карте соответствует большему содержанию элемента в данной области.

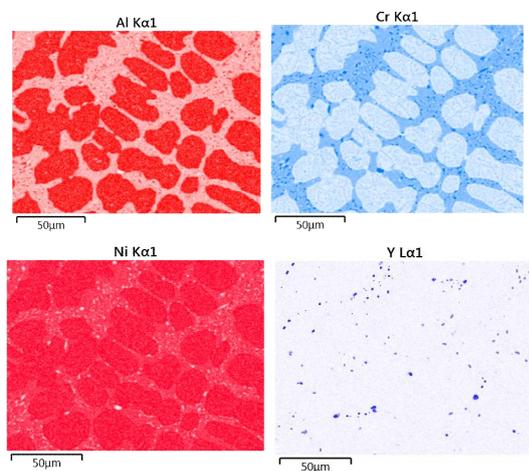


Рис. 5. Рентгеноспектральный микроанализ опытного слитка контрольной плавки / Fig. 5. X-ray microanalysis of an experienced control melt ingot

Как видно из рисунка 5, в исследуемой площади образца отсутствуют скопления с большой интенсивностью цветов. То есть можно сделать

вывод, что на всех картах отсутствует структурная неоднородность по исследуемым элементам. Однако для хрома характерно большее выделение на границах зерен.

Иттрий имеет низкие показатели растворимости в опытных сплавах, что может привести к выявлению большого количества включений. Итог результатов микроанализа по иттрию позволил установить отсутствие неоднородности на исследуемой площади. Таким образом, получены слитки опытного состава, которые по концентрации химических элементов отвечают требованиям поставленного задания и являются гомогенными, что подтверждает эффективность способа их получения.

Выводы

Рассмотрены способы получения сплавов на основе никеля с системой легирования Cr–Al–Y при изготовлении катодов для нанесения жаростойких и жаропрочных покрытий лопаток газотурбинных двигателей и установок.

Описаны дефекты в виде пор, несплошностей, неравномерности распределения легирующих элементов, возникающие в никелевых катодах при выплавке, и рассмотрено их влияние на качество наносимых покрытий.

Показано, что существующие технологии не позволяют обеспечить производство бездефектных катодов с высоким уровнем однородности структуры и состава.

Рассмотрена возможность усовершенствования технологии вакуумно-дугового переплава как одной из наиболее перспективных для получения слитков высокого качества с низким уровнем ликвационной и структурной неоднородности. Повышение качества слитков достигается за счет использования шихтовых материалов различного фракционного состава, подбора оптимальных параметров переплава (ток, напряжение, время плавки, температура подогрева кокиля, температура разливки).

Получены опытные образцы сплава на никелевой основе. Определены коэффициенты перехода элементов. Проведены металлографические исследования макро- и микроструктуры, а также химического состава, которые показали высокую степень гомогенности слитков и, отсутствие характерных дефектов. А это позволяет прогнозировать повышение качества и в свою очередь эффективности нанесения защитных покрытий, что положительно скажется на ресурсе и работоспособности изделий, которыми являются ответственные детали авиационного назначения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Симс Ч. Т. Суперсплавы II : Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок : монография / Ч. Т. Симс. – Москва : Металлургия, 1995. – 384 с.
2. Масленков С. Б. Справочник жаропрочных сталей и сплавов / С. Б. Масленков. – Москва : Металлургия, 1983. – 192 с.

3. Ефанов В. С. Влияние технологии изготовления катодов на качество покрытий лопаток турбины / В. С. Ефанов, В. В. Клочихин, 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. Электронно-лучевая плавка тугоплавких и высокорекреационных металлов : монография / [Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, С. В. Ахонин]. – Киев : Наукова думка, 2008. – 312 с.
6. Литейные сплавы на основе тяжелых цветных металлов: монография / [Р. К. Мысик, А. В. Сулицин, С. В. Брусницын]. – Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2016. – 140 с.
7. Асланян И. Р. Современные тенденции развития технологии изготовления модельных композиций для литья жаропрочных сплавов / И. Р. Асланян, О. Г. Оспенникова // Фундаментальные и прикладные исследования в области создания литейных жаропрочных никелевых и интерметаллидных сплавов и высокоэффективных технологий изготовления деталей ГТД : науч.-техн. конф. – 2017. – С. 49–58.
8. Горюнов А. В. Современная технология получения литейных жаропрочных никелевых сплавов / А. В. Горюнов, В. Е. Ригин // Авиационные материалы и технологии. – 2014. – № 2. – С. 3–7.
9. Сидоров В. В. Организация производства литых прутковых заготовок из современных литейных высокожаропрочных никелевых сплавов / В. В. Сидоров, В. Е. Ригин, Д. Е. Каблов // Литейное производство. – 2011. – № 10. – С. 2–5.
10. Ночовная Н. А. Исследование литейных характеристик жаропрочного интерметаллидного титанового сплава ВТИ-4 / Н. А. Ночовная, А. С. Кочетков, К. А. Боков, В. И. Иванов // Труды ВИАМ : электрон. науч.-технич. журн. – 2017. – № 5. – Ст. 02. – Режим доступа : URL: <http://www.viam-works.ru>

REFERENCES

1. Sims Ch.T. *Supersplavy II: zharoprochnye materialy dlya aehrokosmicheskikh i promyshlennykh ustanovok* [Superalloys II: heat-resistant materials for aerospace and industrial installations]. Moscow : Metallurgiya Publ., 1995, 384 p. (in Russian).
2. Maslenkov S.B. *Spravochnik zharoprochnykh stalej i splavov* [Reference book of heat-resistant steel and alloys]. Moscow : Metallurgiya Publ., 1983, 192 p. (in Russian).
3. Yefanov V.S., Klochikhin V.V., Pedash A.A. and Shylo V.G. *Vliyanie tehnologii izgotovleniya katodov na kachestvo pokrytij lopatok turbiny* [The effect of cathode manufacturing technology on the quality of turbine blade coatings]. *Vestnik dvigatelestroeniya* [Bulletin of engine building], 2018, no. 1, pp. 132–137. (in Russian).
4. Ovchinnikov A.N., Teslevich S.M., Tizenberg D.L. and Yefanov V.S. *Tehnologija vyplavki slitkov dlja poluchenija katodov iz kobal'tovogo splava sposobom dugovogo pereplava* [Technology of melting ingots of cobalt alloy by the arc remelting method]. *Sovremennaja jelektrometallurgija* [Modern electrometallurgy], 2019, no. 1, pp. 23–27. (in Russian).
5. Paton B.Y., Trigub N.P. and Ahonin S.V. *Elektronno-luchevaya plavka tugoplavkih i vyisokoreaktsionnykh metallov* [Electron beam melting of refractory and highly reactive metals]. Kyiv : Nakova dumka Publ., 2008, 213 p. (in Russian).
6. Mysik R.K. *Litejnye splavy na osnove tjazhelykh cvetnykh metallov* [Casting alloys based on heavy non-ferrous metals on heavy non-ferrous metals]. Ekaterinburg: Ural'skogo universiteta Publ, 2016, 140 p. (in Russian).
7. Aslanjan I.R. and Ospennikova O.G. *Sovremennye tendencii razvitija tehnologii izgotovlenija model'nykh kompozicij dlja lit'ja zharoprochnykh splavov* [Modern trends in the development of technology for making model compositions for casting superalloys]. Fundamental and applied research in the field of creating foundry heat-resistant nickel and intermetallic alloys and highly efficient technologies for the manufacture of GTE parts : scient. and tech. conf., 2017, pp. 49–58. (in Russian).
8. Gorjunov A.V. and Rigin V.E. *Sovremennaja tehnologija poluchenija litejnykh zharoprochnykh nikelovykh splavov* [Modern technology for casting high-temperature nickel alloys]. *Aviacionnye materialy i tehnologii* [Aviation materials and technologies], 2014, no. 2, pp. 3–7. (in Russian).
9. Sidorov V.V., Rigin V.E. and Kablov D.E. *Organizacija proizvodstva litykh prutkovykh zagotovok iz sovremennykh litejnykh vysokozharoprochnykh nikelovykh splavov* [Organization of production of cast bar stock from modern foundry high-temperature nickel alloys]. *Litejnoe proizvodstvo* [Foundry], 2011, no. 10, pp. 2–5. (in Russian).
10. Nochovnaja N.A., Kochetkov A.S., Bokov K.A. and Ivanov V.I. *Issledovanie litejnykh harakteristik zharoprochnogo intermetallidnogo titanovogo splava VTI-4* [Research of casting characteristics of heat-resistant intermetallic titanium alloy VTI-4]. *Trudy VIAM : jelektron. nauch.-tehnich. zhurn.*, 2017, no. 5, art. 02.

Поступила в редакцию 27.05.2019.