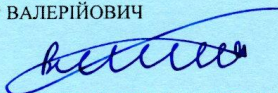


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

КЛОЧИХІН ВОЛОДИМИР ВАЛЕРІЙОВИЧ



УДК 669.24.002.8:621.74.045

**МАТЕРІАЛОЗНАВЧІ ОСНОВИ ПРОЦЕСІВ ОТРИМАННЯ
ЖАРОМІЦНИХ НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ ДЛЯ ЛОПАТОК ТУРБІН З
ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЗВОРОТУ**

05.02.01 – Матеріалознавство

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Запоріжжя – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному університеті «Запорізька політехніка» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор **НАУМИК ВАЛЕРІЙ ВЛАДИЛЕНОВИЧ**, проректор з НР та МД Національного університету «Запорізька політехніка», професор кафедри машин і технології ливарного виробництва.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор **ГЛУШКОВА ДІАНА БОРИСІВНА**, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, завідувач кафедри технології матеріалів та матеріалознавства;

доктор технічних наук, професор **КАЛІНІНА НАТАЛІЯ ЄВГРАФІВНА**, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, професор кафедри технології виробництва.

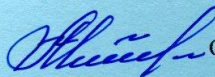
Захист відбудеться «06» листопада 2020 року о 13³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д17.052.01 у Національному університеті «Запорізька політехніка» за адресою: 69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64, ауд. 153.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету «Запорізька політехніка» за адресою: 69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64, та на сайті університету у розділі «Наука» – «Спеціалізована вчена рада».

Автореферат розіслано «28» серпня 2020 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради,
доктор технічних наук, професор

 О.А. Мітяєв

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Лопатки сучасних газотурбінних двигунів з рівноважною та направленою макроструктурою виготовляють з жароміцних нікелевих сплавів типа EI437, ЖСЗЛС, ЖСЗДК, ЗМІ-ЗУ, ЖС6У, ЖС26, ЖС32, МАР-М-002 і інших на установках типу УППФ-3М і УВНК-8П.

Сучасні економічні умови вимагають зниження собівартості виробів при збереженні рівня їх експлуатаційних властивостей. Одним з шляхів зниження вартості виливків з жароміцних нікелевих сплавів є використання в шихті при їх виплавленні технологічного звороту.

Перед використанням поверхневі зони ливарних відходів проходять попереднє очищення. Для збереження властивостей на рівні виробів, отриманих з використанням винятково первинних шихтових матеріалів, застосовують різноманітні технологічні процеси рафінування сплавів. В той же час, закономірності, що забезпечують ефективність останніх, на даний момент вивчені ще недостатньо.

Представлена робота присвячена вирішенню важливої наукової та практичної задачі – розвитку матеріалознавчих основ процесів отримання жароміцних нікелевих сплавів для лопаток газотурбінних двигунів при повторному використанні в шихті технологічного звороту за рахунок застосування різних технологічних процесів та методів рафінування, що забезпечують відповідність усім вимогам нормативно-технічної документації до матеріалу та литих виробів за рівнем фізико-механічних, жароміцних та експлуатаційних властивостей.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертацію виконано на кафедрі «Машини і технологія ливарного виробництва» Національного університету «Запорізька політехніка» відповідно до:

- Закону України "Про пріоритетні напрямки розвитку науки і техніки" від 11.07.2001 р. № 2623-III;

- спільних науково-дослідних робіт Національного університету «Запорізька політехніка» та АТ «Мотор Січ»: «Дослідження та розробка технології виробництва лопаток спрямованої кристалізації з використанням зворотних відходів сплавів ЖС32-ВІ і ЖС26-ВІ» (№4612, 2002 р.); «Експериментальні та технологічні дослідження з розробки технологічного процесу лиття турбінних лопаток для турбореактивного двоконтурного двигуна (ТРДД) в класі тяги 6500...9000 кгс» (№2622, 2012 р.), виконаної, як складову частину бюджетної програми КПКВК 2601170 «Державна підтримка виробництва авіаційної техніки і вертольотів та двигунів до них, в тому числі через механізм здешевлення кредитів» та «Рафінування електронно-променевим переплавом зворотних відходів жароміцних

нікелевих сплавів для литих деталей авіаційного авіабудування, що отримуються методом високошвидкісної спрямованої кристалізації» (№2616, 2016-2017 рр., № державної реєстрації 0117U001818), науково-дослідної роботи «Розробка та випробування імпортозамінних та ресурсозберігаючих технологій виробництва високоякісного литва з кольорових сплавів для авіадвигунів подвійного призначення» (ДБ 02319, 2019 р. № державної реєстрації 0119U100527), в яких автор був виконавцем.

Мета та завдання досліджень. Метою роботи є розвиток матеріалознавчих основ процесів отримання якісних жароміцних нікелевих сплавів із використанням технологічного звороту та застосуванням сучасних методів рафінування, а також забезпечення в них і в готових литих виробках механічних, технологічних та експлуатаційних властивостей на рівні виробів з первинних матеріалів.

Для досягнення цієї мети були поставлені наступні завдання:

1. Аналіз сучасних технологічних процесів одержання литих лопаток із жароміцних нікелевих сплавів для газотурбінних двигунів з використанням технологічного звороту;

2. Аналіз складу і розподілу шкідливих домішок в ливарних відходах нікелевих жароміцних сплавів;

3. Вивчити особливості рафінування ливарних відходів нікелевих сплавів в різних термочасових умовах;

4. Вивчити вплив кристалізаційних процесів на рафінування ливарних відходів нікелевих сплавів;

5. Дослідити поведінку нітридів і карбонітридів титану при високотемпературному обробленні розплаву нікелевих сплавів;

6. Визначити раціональну технологію рафінування ливарних відходів нікелевих сплавів, що забезпечує щільну структуру та необхідні властивості виливків;

7. Розробити методику випробування литих лопаток газотурбінних двигунів на кут загину;

8. Провести апробацію та впровадити на АТ «Мотор Січ» раціональну технологію отримання якісних шихтових заготовок і лопаток з використанням ливарних відходів нікелевих сплавів.

Об'єкт дослідження – процеси, що забезпечують отримання якісних жароміцних нікелевих сплавів для лопаток газотурбінних двигунів з використанням технологічного звороту, які відповідають всім вимогам нормативно-технічної документації за рівнем фізико-механічних, жароміцних та експлуатаційних властивостей.

Предмет дослідження – закономірності зміни структури, фізико-механічних, жароміцних та експлуатаційних властивостей нікелевих сплавів в залежності від використання при виплавленні в шихті технологічного

звороту та застосування різноманітних технологічних процесів і методів рафінування.

Методи дослідження. Плавлення жароміцних нікелевих сплавів проводили на установках типу УППФ-3М, ULVAC FM 1-2-100, УВНК-8П і ПМП-4М. За допомогою стандартних методик вивчали хімічний склад, структуру, фізико-механічні властивості матеріалу дослідних зразків при різних температурах.

Диференціальний термічний аналіз проводили на автоматичній установці ВДТА-8МЗ в середовищі гелію. Якість поверхні виливків контролювали візуальним оглядом та капілярним методом ЛЮМ1-ОВ.

З використанням розробленої методики провели випробування литих лопаток ГТД на кут вигину.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше вивчено кластерний механізм поведінки мікроугруповань $Ti(C,N) \cdot Ni_3(Ti,Al)$ та подібних їм в умовах підвищення температур високотемпературної обробки розплаву (ВТОР). Встановлено, що в процесі тривалої витримки при температурах вище 1800 °С дані мікроугруповання починають дробитися та руйнуватися, інтенсивно втрачаючи азот і наближаючись за складом до карбідів. Зменшення часу витримки при ВТОР призвело до того, що мікроугруповання не встигали втратити оболонки з динамічних кластерів, що блокувало розвиток зародків кристалів γ -фази та призводило до переохолодження розплаву.

2. Отримали подальший розвиток наукові та технологічні уявлення про особливості рафінування технологічного звороту в процесі спрямованої кристалізації. Встановлено, що спрямована кристалізація нікелевих сплавів, у порівнянні з об'ємною, забезпечує рафінування сплаву від таких шкідливих домішок як кисень, азот, залізо, свинець, а також нітридних, карбонітридних та оксидних включень. Спрямована кристалізація тонкостінних виливків не забезпечує очищення металу від оксидних плівок, шлакових включень та необхідної щільної структури. В аналогічних умовах було отримано якісні зливки діаметром 80 мм, при цьому низькотемпературне вакуумне переплавлення дозволяє звести до мінімуму випалювання активних кошовних легувальних елементів (тантал, реній, ніобій та ін.).

3. Отримали подальший розвиток теоретичні уявлення про вплив температурного градієнту на фронт кристалізації нікелевих сплавів в умовах високошвидкісної спрямованої кристалізації (ВСК). Встановлено, що підвищення швидкості кристалізації в сплаві галію з індієм забезпечують формування плоского фронту кристалізації. Це дозволяє знизити ймовірність утворення структурних дефектів і підвищити тріщиностійкість та інші властивості виливків.

4. Отримали подальший розвиток теоретичні уявлення про високотемпературне оброблення розплаву ливарних відходів. Встановлено суттєве випалювання практично всіх легувальних елементів, особливо зі збільшенням тривалості витримки. Водночас відбувається зниження вмісту азоту в сплавах, а також підвищення однорідності розплаву, в результаті чого кристалізація металу починалася при більшому переохолодженні. Це дозволило забезпечити подрібнення структурних складових, зниження розвитку ліквацийних процесів і суттєво поліпшити властивості виливків.

5. Отримали подальший розвиток технологічні уявлення про комплексне рафінування ливарних відходів в процесі вакуумного індукційного та електронно-променевого переплавів. Встановлено, що змінювання потужності електронного променя дозволяє підвищувати ефективність рафінування. Комбінований метод рафінування дозволив отримати шихтову заготовку сплавів ЖС26 і ЖС32 без випалювання активних легувальних елементів з щільною та однорідною структурою, практично без ліквацийних та усадочних дефектів.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Розроблений метод випробування литих лопаток газотурбінних двигунів на кут загину випробувано при виробництві дослідно-промислової партії лопаток зі сплаву ЖСЗДК-ВІ із застосуванням високотемпературної обробки розплаву та впроваджено на АТ «Мотор Січ». Проведені випробування підтвердили достовірність та добру стабільність результатів, отриманих за даною методикою, що дозволило рекомендувати її для поширення широкої практики оцінки можливих варіантів якості лопаток у виробництві (акт від 11.11.2019 р.).

2. Встановлено, що з використанням технологічного звороту можуть виготовлятися якісні виливки з жароміцних нікелевих сплавів із рівноважною та спрямованою макроструктурою, що задовольняють всім вимогам нормативно-технічної документації. Найбільш надійною та економічною технологією очищення поверхневих зон технологічного звороту є дробеструменеве оброблення з наступним обдуванням електрокорунду і травленням.

3. Спрямована кристалізація зливків діаметром 80 мм із сплавів ЖС32-ВІ, ЖС26-ВІ, ВЖЛ12У-ВІ в умовах знижених температур (не більше 1455 °С) на установці ПМП-4М забезпечила мінімальний угар активних дорогих легувальних елементів (тантал, реній, ніобій і ін.), очищення металу від оксидних плівок, шлакових включень та отримання необхідної щільної структури.

4. Підвищення швидкості кристалізації виливків з нікелевих сплавів в умовах ВСК в сплаві галію з індієм забезпечують плаский фронт кристалізації та знижують ймовірність утворення структурних дефектів, що підвищує їх тріщиностійкість та інші властивості.

5. Дослідно-промислове випробування розробленого комбінованого

методу рафінування жароміцних нікелевих сплавів в процесі вакуумного індукційного і електронно-променевого переплавів на базі АТ «Мотор Січ» довело його високу ефективність і перспективність для використання на підприємствах авіаційного та енергетичного машинобудування. Комбінований метод рафінування ливарних відходів сплавів ЖС26 і ЖС32 (ВІП+ЕПП) дозволив отримати шихтові заготовки без угару активних легувальних елементів, щільною й однорідною структурою, з незначним розвитком ліквідаційних і усадочних процесів. При цьому, на відміну від високотемпературної обробки розплаву, процес ВІП+ЕПП не вимагає спеціальних вогнетривів для плавильного тигля та системи напуску інертного газу (акт від 11.11.2019 р.).

6. На базі АТ «Мотор Січ» налагоджено серійне виробництво робочих лопаток, що відливаються методом високошвидкісної спрямованої кристалізації з сплавів ЖС26-ВІ і ЖС32-ВІ з використанням 50% первинного технологічного звороту.

У вакуумній плавильній установці «ULVAC» FM-1-2-100 налагоджено виробництво сплавів ЖС6К-ВІ, ЖС3ДК-ВІ, ЖС26-ВІ та ЖС32-ВІ з використанням в шихті до 100 % технологічного звороту. Хімічний склад отриманих пруткових заготовок за висотою відповідає вимогам технічних умов. Механічні та жароміцні властивості зразків, що досліджувались, відповідають вимогам нормативно-технічної документації. Очікуваний економічний ефект від впровадження технології виробництва жароміцних нікелевих сплавів з використанням технологічного звороту за 2019 р. складає 7700 тис. грн. (акт від 11.11.2019 р.).

7. Отримані теоретичні та практичні результати впроваджені в навчальний процес кафедри «Машини і технологія ливарного виробництва» Національного університету «Запорізька політехніка» (акт від 03.03.2020 р.)

Особистий внесок здобувача. Основні результати і висновки, що приведені в дисертаційній роботі, були отримані і зроблені автором самостійно. У роботах, опублікованих в співавторстві, пошукачеві належать:

- постановка експериментів з визначення впливу складу і технологічних факторів на структуру та властивості жароміцних нікелевих сплавів і виливків з них з рівноважною, спрямованою та монокристалічною макроструктурою, аналіз отриманих результатів [3, 5, 9, 12, 18, 22, 26, 27, 45, 46];

- проведення досліджень структури, механічних та експлуатаційних властивостей виливків із жароміцних нікелевих сплавів зі спрямованою та монокристалічною макроструктурою [2, 4, 7, 9, 10, 17, 28, 30, 38, 39];

- проведення аналізу результатів рафінування технологічного звороту жароміцних сплавів в процесі низькотемпературного вакуумного переплавлення та спрямованої кристалізації, вивчення впливу даних процесів

на структуру та властивості сплавів і виливків [23, 29, 31, 33, 35, 36, 37, 40];

- вивчення властивостей сплавів і виливків, аналіз і узагальнення отриманих результатів [1, 16, 19, 22, 23, 24, 25, 43, 45, 46,];

- вивчення та пояснення нових механізмів структурного зміцнення, фазових та структурних перетворень при високотемпературній обробці розплаву, аналіз і узагальнення отриманих результатів [8, 11, 27];

- розробка комплексних технологічних процесів отримання якісних виливків і зливків [13, 14, 15, 22, 45, 46];

- проведення високотемпературного диференційно-термічного аналізу жароміцного нікелевого сплаву [34];

- проведення досліджень із вивчення якості металу після об'єднаного вакуумно-індукційного і електронно-променевого переплаву [6, 18, 20, 21, 32];

- розробка технологічного процесу одержання жароміцних нікелевих сплавів із власного технологічного звороту [41, 42, 44].

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на міжнародних і республіканських конференціях, семінарах: Міжнародна конференція «Нові конструкційні сталі та стопи та методи їх обробки для підвищення надійності та довговічності виробів» (Запоріжжя, 1998 р.); Міжнародна науково-технічна конференція «Повышение качества и экономичности литейных процессов» (Одеса, 2000 р.); IX Міжнародна науково-технічна конференція «Неметалеві включення і гази в ливарних сплавах» (Запоріжжя, 2000 р.); VIII Міжнародна науково-технічна конференція «Прогрессивные технологии и системы машиностроения» (Донецьк, 2001 р.); VIII Міжнародний симпозіум «Высокочистые металлические и полупроводниковые материалы» (Харків, 2002 р.); IX, X і XIII Міжнародні науково-технічні конференції «Машиностроение и техносфера XXI века» (Севастополь, 2002, 2003, 2006 pp.); III та IV Міжнародні конференції «Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов» (Харків, 2002, 2003 pp.); II, XI і XII Міжнародні науково-технічні конференції «Специальная металлургия: вчера, сегодня, завтра» (Київ, 2002, 2013, 2014 pp.); 65th World Foundry Congress (Кьонджу, Корея, 2002 р.); IV щорічна Промислова конференція з міжнародною участю та виставка «Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях» (п.Славське, Карпати, 2004р.); 66th World Foundry Congress (Стамбул, Туреччина, 2004 р.); IV Міжнародна конференція «Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий» (Жуковка, Росія, 2006 р.); Міжнародна молодіжна науково-технічна конференція «Молодежь в авиации: новые решения и перспективные технологии» (Алушта, 2007 р.); II і IV Міжнародні науково-технічні конференції «Перспективные технологии, материалы и оборудование в литейном производстве» (Краматорськ, 2009, 2013 pp.); X Міжнародна

науково-технічна конференція «Прогрессивные технологии жизненного цикла авиационных двигателей и энергетических установок» (Запоріжжя, 2013 р.); XI Міжнародна науково-технічна конференція «Нові матеріали і технології в машинобудуванні – 2019» (Київ, 2019 р.); MS and T 2019 - Materials Science and Technology 2019 (Portland, Oregon USA, 2019 р.).

Публікації. Основні матеріали і результати дисертації опубліковані в 46 роботах, з них: 22 – статті у фахових наукових виданнях, з яких 9 входять до наукометричних баз даних, а також в 24 матеріалах і тезах доповідей на конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертації складає 205 сторінок, з них 137 сторінок основного тексту, 39 таблиць, 62 рисунки, список використаних літературних джерел з 170 найменувань на 19 сторінках та 5 додатків на 16 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, визначено її мету і задачі, висвітлено наукове і практичне значення, особистий внесок здобувача.

У **першому розділі** наведено огляд технічної літератури з питань існуючих технологічних процесів отримання жароміцних нікелевих сплавів для лопаток газотурбінних двигунів в тому числі при повторному використанні в шихті технологічного звороту, процесів і методів рафінування та вимог до матеріалу і литих виробів за рівнем фізико-механічних, жароміцних і експлуатаційних властивостей.

Сформульовано мету дослідження та задачі, які необхідно вирішити для її досягнення.

У **другому розділі** викладені загальні методичні положення роботи.

Плавки досліджуваних розплавів проводили в сучасних вакуумних печах в лабораторних і виробничих умовах.

Хімічний склад, структуру, механічні, фізико-хімічні і експлуатаційні властивості дослідних сплавів визначали з використанням сучасних достовірних методик і устаткування, з відносною помилкою не більше 5 %.

Розроблено метод випробування литих лопаток газотурбінних двигунів на кут загину.

Третій розділ присвячений питанням дослідження процесів рафінування технологічного ливарного вороття жароміцних нікелевих сплавів.

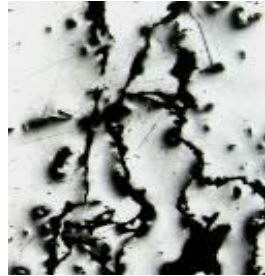
Рекомендовано очищення поверхневих зон ливарних відходів дробеструменевою обробкою з подальшим обдуванням електрокорундом і травленням в реактиві ($390 \text{ см}^3/\text{дм}^3 \text{ HNO}_3$; $380 \text{ см}^3/\text{дм}^3 \text{ HCl}$ і $99 \text{ см}^3/\text{дм}^3 \text{ HF}$) при температурі 25°C протягом 0,5 години.

Направлена кристалізація нікелевих сплавів в порівнянні з об'ємною

забезпечувала очищення сплаву від кисню, азоту, заліза, свинцю, нітридних, карбонітридних, оксидних включень.

Направлена кристалізація тонкостінних виливків (лопаток) зі сплавів ЖС32-ВІ, ЖС26-ВІ, ВЖЛ12У-ВІ в умовах знижених температур (не більш 1455°C) на установці ПМП-4М не забезпечувала очищення металу від оксидних плівок, шлакових включень і необхідної щільної структури. Карбіди в структурі лопаток з усіх сплавів мали «шрифтову» морфологію та розташовувалися у вигляді грубого каркасу в міждендритних просторах (рис. 1).

Оксидні плівки, $\times 100$



Карбіди, $\times 200$



Евтектична (γ - γ')-фаза, $\times 500$



ЖС32-ВІ

ЖС26-ВІ

ВЖЛ12У-ВІ

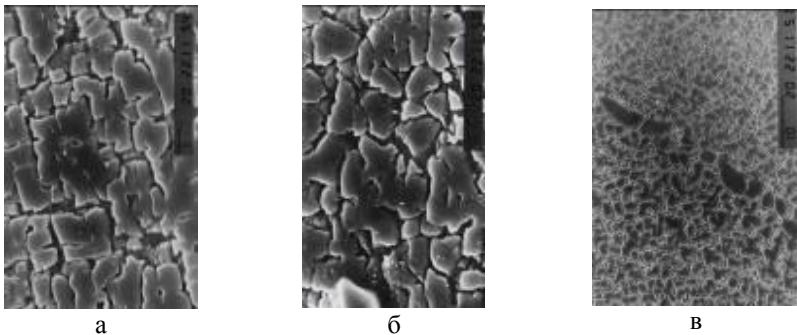
Рисунок 1 – Мікроструктура лопаток, що були отримані на установці ПМП-4М з ливарних відходів сплавів ЖС32-ВІ, ЖС26-ВІ, ВЖЛ12У-ВІ

Розміри евтектичної (γ - γ')-фази в лопатках сягали 250 мкм (див. рис. 1), що в 3...8 разів більше, ніж в серійних лопатках. Виділення боридної евтектики мали розміри до 200 мкм. Крупні виділення помітно знижують межу міцності сплавів при високих температурах, що в окремих випадках призводить до утворення тріщин довжиною до 1 мм з боку внутрішнього (охолоджуємого) каналу лопатки.

Аналогічні умови кристалізації товстостінних виливків (зливки діаметром 80 мм) з цих сплавів дозволили отримати метал без дефектів.

Максимальні розміри евтектичної (γ - γ')-фази збільшувались від нижніх до верхніх частин зливка, а також від крайових до центральних зон в верхніх частинах.

Інтерметалідна γ' -фаза в осях дендритів мала форму близьку до кубічної (рис. 2 а), а в міжосьових просторах – безформну (рис. 2 б). Її розміри в даних сплавах складали 0,8...3,0 мкм. Досліджена технологія спрямованої кристалізації сприяла помітному очищенню меж кристалів та появленню на них "ланцюжка" крупних скоагульованих часток γ' -фази (рис. 2 в).



а – γ' -фаза в осях, $\times 10000$; б – γ' -фаза у міжосьових просторах, $\times 10000$; в – γ' -фаза дендритів та на межах кристалів, $\times 2000$

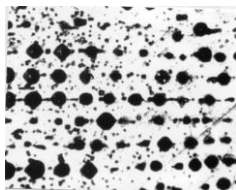
Рисунок 2 – Мікроструктура сплаву ЖС32-ВІ

Низькотемпературний вакуумний перепплав ливарних відходів нікелевих сплавів ЖС32-ВІ і ЖС26-ВІ на установці ПМП-4М дозволяє звести до мінімуму угар активних дорогих легувальних елементів (тантал, реній, ніобій та інші). Присутність великої маси вуглецевих матеріалів в робочому просторі установки під час рафінування розплаву пригнічує окислювальний потенціал натікання в плавильну камеру адсорбованих і атмосферних газів.

В умовах високошвидкісної направленої кристалізації вивчали вплив температурного градієнта на фронті кристалізації на структуру жароміцних нікелевих сплавів ЖС32-ВІ і НВ-4.

Литі зразки циліндричної форми діаметром 9 мм і завдовжки ~150 мм із сплавів НВ-4 (основа – Ni; 32 %W; домішки – не більш 1,0 % Fe; 0,42 % Si; 0,015 % S; 0,015 % P) і ЖС32-ВІ отримували у електрокорундових формах, які переміщали в температурному полі нагрівача з гарячої зони в кристалізатор (сплав галію з 25 % індію). Швидкість кристалізації змінювалася ступінчасто від 0,4 до 20 мм/хв., а градієнт температури складав $G = 20^\circ\text{C}/\text{мм}$.

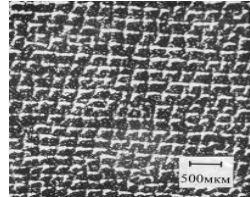
На мікроструктурах (рис. 3) видно послідовність структур, що виникають при втраті стійкості плоским фронтом зростання. Ця послідовність добре узгоджується з відомими даними. На початку порушення стійкості плоского фронту зростання з'являються окремі ямки і лінійчаті поглиблення, формуються витягнуті осередки (див. рис. 3 а, $R = 0,4$ мм/хв.), потім у міру збільшення швидкості направленої кристалізації фронт набуває комірчастої морфології (див. рис. 3 б...д). При швидкості направленої кристалізації $R = 20$ мм/хв. реалізується дендритна структура (див. рис. 3 е).



а



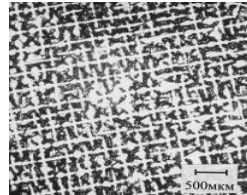
б



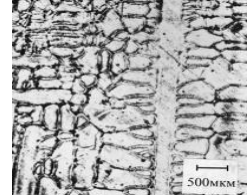
в



г



д

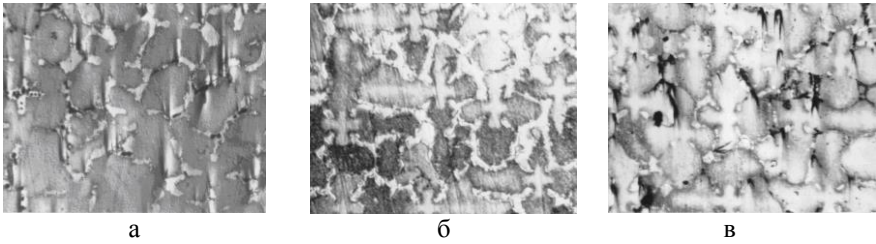


е

а – $R = 0,4$ мм/хв.; б – $R = 1,2$ мм/хв.; в – $R = 2,6$ мм/хв.; г – $R = 4$ мм/хв.; д – $R = 10$ мм/хв.; е – $R = 20$ мм/хв.

Рисунок 3 – Мікроструктура монокристалів сплаву НВ-4, що закристалізовувався з різними швидкостями, $\times 2000$

Макроскопічна форма фронту кристалізації залежить від співвідношення осової і радіальної складової температурного градієнта. На подовжніх шліфах монокристалів (рис. 4) можна спостерігати зміну форми фронту кристалізації із зростанням R . Для низьких швидкостей $R = 0,4$ мм/хв. і $1,2$ мм/хв. фронт мав майже плоску форму.



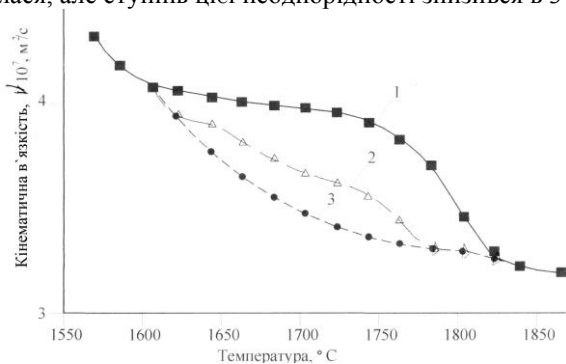
а – 1,2 мм/хв.; б – 4,0 мм/хв.; в – 10 мм/хв.

Рисунок 4 – Мікроструктура фронту кристалізації монокристалів сплаву ЖС32-ВІ при різних швидкостях спрямованої кристалізації, $\times 100$

Встановлено, що підвищені швидкості кристалізації в сплаві галію з індієм забезпечували плаский фронт кристалізації і знижували вірогідність утворення структурних дефектів. Останнє позитивно позначалося на тріщиностійкості виливків і помітно підвищувало їх властивості.

При високотемпературній обробці розплаву з відходів ряду нікелевих сплавів відбувався угар практично всіх легувальних елементів, особливо із збільшенням тривалості витримки. ВТОР при температурі 1850 °C знижувала масову частку азоту в сплаві в перші 5 хвилин дії з 0,0159 % до 0,0016 %.

На максимальну величину гістерезису кінематичної в'язкості істотно впливала попередня підготовка структури рідкого металу. Максимальна різниця кінематичної в'язкості, заміряна між політермами нагріву початкового сплаву і його охолодження, складала $0,52 \cdot 10^7$ м²/с, а між параметрами нагріву і охолодження розплаву після попередньої ВТОР – $0,17 \cdot 10^7$ м²/с. Отже, після ВТОР деяка неоднорідність структури рідкого металу збереглася, але ступінь цієї неоднорідності знизився в 3 рази (рис. 5).

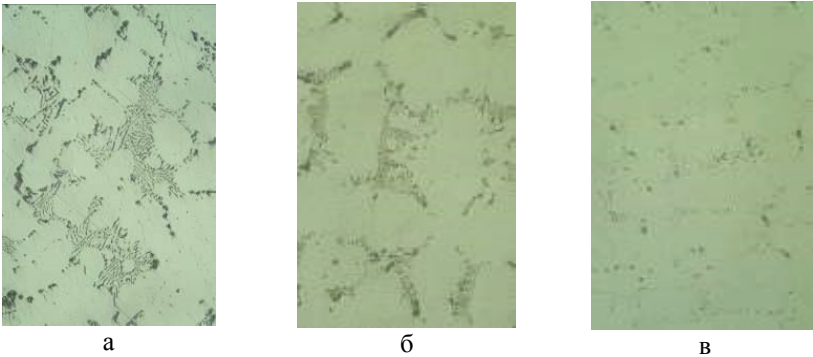


1 – політерма нагріву початкового металу; 2 – політерма нагріву металу після ВТОР, 3 – політерма охолодження металу.

Рисунок 5 – Вплив ВТОР на кінематичну в'язкість сплаву ЖС32К-ВІ

З підвищенням температури ВТОР від 1500 °С до 1650 °С зменшувався інтервал кристалізації сплаву ЖС32-ВІ з 52 °С до 21 °С і збільшувався ступінь легованості його твердого розчину. Спостерігалось підвищення температур повного розчинення γ' -фази і солідусу сплаву, що покращувало фазову і структурну стабільність нікелевого жароміцного сплаву.

Збільшення часу витримки розплаву від 5 до 10 хвилин сприяло зниженню рівня переохолодження, що приводило до виділення карбідів при вищій температурі і покращувало їх морфологію (рис. 6).



а – 1550 °С; б – 1700 °С; в – 1850 °С.

Рисунок 6 – Карбіди в сплаві ЖС32-ВІ після ВТОР при різних температурах, $\times 100$.

Помітно поліпшувалася однорідність розплаву, що дозволяло кристалізації металу починатися при більшому переохолодженні, забезпечувало подрібнення структурних складових, знижувало розвиток ліквідаційних процесів і істотно покращувало властивості виливків.

Запропоновано модель процесів, що протікають при ВТОР жароміцних нікелевих сплавів ЖС32-ВІ і ЖСЗДК-ВІ.

При температурі не вище за 1600 °С в рідкому металі були присутні нітриди (TiN, TaN) і карбонітриди [Ti(C,N)], [Ta(C,N)]. Із збільшенням температури розплаву вище 1600 °С такі включення збагачувалися вуглецем, підвищувалася їх змочуваність металом і вони починали руйнуватися. В розплаві відбувалося утворення динамічних мікроагрегатів атомів типу [Ni₃(Ti,Al)], [Ni₃(Ta,Al)]. Із зростанням температури металу від 1600 °С до 1800 °С ці мікроагрегування збагачувалися титаном, танталом і алюмінієм, одночасно обіднюючись елементами, зазвичай легуючими γ -фазу (хром, кобальт).

При температурах близьких до 1800 °С частки Ti(C,N), Ta(C,N) починали інтенсивно дробитися до розмірів менше 0,01 мкм. Вони ставали

стаціонарними кластерами, які взаємодіяли з динамічними кластерами типу $[\text{Ni}_3(\text{Ti},\text{Al})]$, $[\text{Ni}_3(\text{Ta},\text{Al})]$ та створювали комплекси $\text{Ti}(\text{C},\text{N}) \cdot \text{Ni}_3(\text{Ti},\text{Al})$ або $\text{Ta}(\text{C},\text{N}) \cdot \text{Ni}_3(\text{Ta},\text{Al})$.

При температурах вище 1800°C в цих комплексах складова $[\text{Ni}_3(\text{Ti},\text{Al})]$, $[\text{Ni}_3(\text{Ta},\text{Al})]$ починала руйнуватися і відбувалася інтенсивна втрата азоту. За складом вони наближалися до первинних карбідів МС.

Тривала витримка розплаву при температурах вище 1800°C призводила до зникнення оболонки з динамічних кластерів $[\text{Ni}_3(\text{Ti},\text{Al})]$, $[\text{Ni}_3(\text{Ta},\text{Al})]$ навколо мікроаглюмувань $\text{Ti}(\text{C},\text{N})$, $\text{Ta}(\text{C},\text{N})$. При охолодженні розплаву частина цих мікроаглюмувань зберігалася і служила, в першу чергу, підкладками для утворення первинних карбідів МС, в другу чергу – центрами кристалізації для γ -фази. Відсутність кінетичних труднощів для розвитку центрів кристалізації γ -фази в дендрити не приводила до переохолодження розплаву. У результаті утворювалася грубозерниста структура сплаву з рівновісними карбідами.

Із зменшенням часу витримки при ВТОР частина мікроаглюмувань $\text{Ti}(\text{C},\text{N})$, $\text{Ta}(\text{C},\text{N})$ не встигали втратити оболонки з динамічних кластерів, що блокувало комплексами $\text{Ti}(\text{C},\text{N}) \cdot \text{Ni}_3(\text{Ti},\text{Al})$ і $\text{Ta}(\text{C},\text{N}) \cdot \text{Ni}_3(\text{Ta},\text{Al})$ розвиток зародків кристалів γ -фази і приводило до переохолодження розплаву. Велика частина мікроаглюмувань $\text{Ti}(\text{C},\text{N})$, $\text{Ta}(\text{C},\text{N})$ втрачала активно азот і перетворювалась, по суті, в TiC і TaC та модифікувала на останніх стадіях кристалізації розплав і служила підкладками для γ -фази. Це сприяло диспергуванню дендритних осередків і всіх первинних виділень.

Комбінований метод рафінування ливарних відходів сплавів ЖС26 і ЖС32 (ВІП+ЕПП) в порівнянні з серійною технологією ВІП краще очищає метал від шкідливих домішок (залізо, свинець, кисень), дозволяє отримувати зливки (шихтову заготовку) з меншими усадковою раковиною і пористістю, з рівномірним розподілом і більш дисперсними структурними складовими, з меншим розвитком ліквідаційних процесів. Змінювання потужності електронного променя дозволяє підвищувати ефективність рафінування ливарних відходів. При цьому, на відміну від ВТОР, процес ВІП+ЕПП не вимагає спеціальних вогнетривів для плавильного тигля та системи напуску інертного газу.

Четвертий розділ присвячений дослідно-промислового випробуванню та впровадженню отриманих результатів досліджень.

На базі АТ «Мотор Січ» налагоджено серійне виготовлення робочих лопаток методом високошвидкісної спрямованої кристалізації із сплавів ЖС26-ВІ і ЖС32-ВІ з використанням 50 % первинного технологічного звороту.

У вакуумній плавильній установці «ULVAC» FM-1-2-100 налагоджено виробництво сплавів ЖС6К-ВІ, ЖС3ДК-ВІ, ЖС26-ВІ і ЖС32-ВІ зі 100 % технологічного звороту. Отримані сплави за рівнем властивостей повністю відповідають вимогам нормативно-технічної документації (табл. 1).

Таблиця 1 – Властивості дослідних жароміцних сплавів (ВСК)

Сплав	Механічні при 20 °С		Жароміцність		
	σ_B , МПа	δ , %	Температура випробування, °С	Напруження, МПа	Час до руйнування, год.
ЖС26-ВІ	1046 1182	6,4 6,2	975	26	62,0 63,0
ТУ 1-92-177-91	≥ 900	$\geq 6,0$			$\geq 40,0$
ЖС32-ВІ	1122 1027 1172	7,2 8,0 7,6	1000	28	67,0 83,3 45,0
ТУ 1-92-177-91	≥ 900	$\geq 6,0$			$\geq 40,0$

Очікуваний економічний ефект від впровадження розробленої технології виробництва жароміцного сплаву з використанням технологічного звороту складає за 2019 р. 7700 тис. грн. (акт від 11.11.2019 р.)

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі приведено нове технічне рішення наукової і практичної задачі, що виражається в розвитку матеріалознавчих основ процесів отримання жароміцних нікелевих сплавів для лопаток газотурбінних двигунів при повторному використанні в шихті технологічного звороту за рахунок застосування різних технологічних процесів і методів рафінування, що забезпечують відповідність всім вимогам нормативно-технічної документації до матеріалу і литих виробів за рівнем фізико-механічних, жароміцних і експлуатаційних властивостей.

На основі проведених теоретичних і експериментальних досліджень зроблені наступні висновки.

1. Аналіз технічної літератури і сучасного стану питання показав, що роботи, присвячені розробці і удосконаленню технологічних процесів застосування сучасних методів рафінування, що дозволяють отримувати якісні жароміцні нікелеві сплави при використанні в шихті технологічного звороту, забезпечують в них і в готових литих виробах механічні, технологічні і експлуатаційні властивості на рівні отриманих за існуючими технологіями виключно з первинних матеріалів, є актуальними.

2. Хімічний склад, структуру, механічні, фізико-хімічні та експлуатаційні властивості дослідних сплавів визначали з використанням сучасних достовірних методик та обладнання, з відносною помилкою не більше 5 %.

Розроблена методика випробування литих лопаток газотурбінних двигунів на кут загину випробовувана при виробництві дослідно-промислової партії лопаток зі сплаву ЖСЗДК-ВІ з застосуванням ВТОР та впроваджена на АТ «Мотор Січ». При випробуванні 20 лопаток виявлено поодинокі дрібні надриви на 2-х лопатках при куті загину 70° і на 4-х лопатках – при куті загину $> 80^\circ$. На інших лопатках при куті загину $80...90^\circ$ спостерігалися лінії деформаційного течії металу без утворення тріщин. Проведені випробування підтвердили достовірність і стабільність результатів, отриманих за розробленою методикою та дозволили рекомендувати її для оцінки якості лопаток у виробництві (акт від 11.11.2019 р.).

3. Поверхневі зони ливарних відходів (ливники, додатки, ливникові чаші, брак виливків) жароміцних нікелевих сплавів ЖС26-ВІ та ЖС32-ВІ схильні до припалу товщиною 0,075 мм і не відповідають стандартному складу за рядом елементів. Найбільш надійною та економічною технологією очищення поверхневих зон є дробеструменева обробка з наступним обдуванням електрокорундом і травленням в реактиві ($390 \text{ см}^3/\text{дм}^3 \text{ HNO}_3$; $380 \text{ см}^3/\text{дм}^3 \text{ HCl}$ і $99 \text{ см}^3/\text{дм}^3 \text{ HF}$) при температурі 25°C протягом 0,5 години.

4. Направлена кристалізація нікелевих сплавів в порівнянні з об'ємною забезпечує рафінування сплаву від кисню, азоту, заліза, свинцю, а також нітридних, карбонітридних і оксидних включень.

5. Спрямована кристалізація тонкостінних виливків (лопаток) із сплавів ЖС32-ВІ, ЖС26-ВІ, ВЖЛ12У-ВІ в умовах знижених температур (не більш 1455°C) на установці ПМП-4М не забезпечує очищення металу від оксидних плівок, шлакових включень і необхідної щільної структури. Аналогічні умови кристалізації зливків діаметром 80 мм з цих сплавів дозволили отримати метал без дефектів.

6. Низькотемпературна вакуумна переплавка ливарних відходів нікелевих сплавів ЖС32-ВІ і ЖС26-ВІ на установці ПМП-4М дозволяє звести до мінімуму угар активних дорогих легувальних компонентів (тантал, реній, ніобій і ін.). Присутність великої маси вуглецевих матеріалів в робочому просторі установки під час рафінування розплаву пригнічує окислювальний потенціал натікання в плавильну камеру адсорбованих і атмосферних газів. Отримані зливки із сплавів ЖС32-ВІ і ЖС26-ВІ мають щільну однорідну макроструктуру. Поверхневий шар зливків, збагачений кремнієм, і їх верхня частина товщиною до 6 мм видаляється при підготовці до плавки отриманої шихтової заготовки.

7. В процесі вивчення впливу температурного градієнту на фронт кристалізації виливків з нікелевих сплавів в умовах ВСК встановлено, що підвищення швидкості кристалізації в сплаві галію з індієм забезпечують плаский фронт кристалізації і знижують вірогідність утворення структурних дефектів, що підвищує їх тріщиностійкість та інші властивості.

8. При високотемпературній обробці розплаву з відходів ряду нікелевих сплавів відбувся випад практично всіх легувальних елементів, особливо із збільшенням тривалості витримки. Істотно знизився вміст азоту в сплавах. При цьому помітно поліпшувалася однорідність розплаву, в результаті чого кристалізація металу починалася при великому переохолодженні, забезпечувалося подрібнення структурних складових, знижувався розвиток ліквідаційних процесів і суттєво покращувалися властивості виливків.

9. Вивчено кластерний механізм поведінки мікрогруповань $Ti(C,N) \cdot Ni_3(Ti,Al)$ і їм подібних в умовах підвищення температур ВТОР, коли при температурах вище 1800 °С ці мікрогруповання починали дробитися і руйнуватися, інтенсивно втрачаючи азот, і за складом наближались до карбідів. Із зменшенням часу витримки при ВТОР мікрогруповання не встигали втратити оболонки з динамічних кластерів, що блокувало розвиток зародків кристалів γ -фази і приводило до переохолодження розплаву.

10. Комбінований метод рафінування ливарних відходів сплавів ЖС26 та ЖС32 (ВІП+ЭЛП) дозволив отримати шихтову заготовку без угару активних легувальних елементів з щільною і однорідною структурою та незначним розвитком ліквідаційних і усадкових процесів.

Встановлено, що змінювання потужності електронного променя дозволяє підвищувати ефективність рафінування ливарних відходів. При цьому, на відміну від ВТОР, процес ВІП+ЭЛП не вимагає спеціальних вогнетривів для плавильного тигля та системи напуску інертного газу.

Дослідно-промислове випробування розробленого комбінованого методу рафінування жароміцних нікелевих сплавів в процесі вакуумного індукційного та електронно-променевого переплавів на базі АТ «Мотор Січ» показало його високу ефективність та перспективність для використання на підприємствах авіаційного та енергетичного машинобудування (акт від 11.11.2019 р.).

11. На базі АТ «Мотор Січ» з використанням результатів проведених досліджень і розроблених технологічних рекомендацій налагоджено серійне виготовлення робочих лопаток, що відливаються методом високошвидкісної спрямованої кристалізації зі сплавів ЖС26-ВІ та ЖС32-ВІ з використанням 50 % первинного технологічного звороту. У вакуумній плавильній установці «ULVAC» FM-1-2-100 налагоджено виробництво сплавів ЖС6К-ВІ, ЖСЗДК-ВІ, ЖС26-ВІ та ЖС32-ВІ з використанням в шихті до 100 % технологічного звороту. Хімічний склад отриманих пруткових заготовок за висотою відповідає вимогам технічних умов. Механічні та жароміцні властивості досліджених зразків відповідають вимогам нормативно-технічної документації.

Очікуваний економічний ефект від впровадження розробленої технології виробництва жароміцного сплаву з використанням технологічного ливарного звороту складає за 2019 р. 7700 тис. грн. (акт від 11.11.2019 р.).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Ключихин В. В., Жеманюк П. Д., Цивирко Э. И., Наумик В. В. Свойства жаропрочных никелевых сплавов после ВТОР. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2000. № 1. С. 41–46.
2. Цивірко Е. І., Ключихін В. В., Коломойцев О. Г., Наумик В. В. Об'ємна та спрямована кристалізація нікелевих сплавів. *Металознавство та обробка металів*. 2000. № 3. С. 5–11.
3. Жеманюк П. Д., Лысенко Н. А., Ключихин В. В., Цивирко Э. И. Влияние состава и технологических факторов на структуру и свойства никелевых сплавов. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2001. № 9. С. 19–23. [**Scopus; Google Scholar**]
4. Цивирко Э. И., Жеманюк П. Д., Ключихин В. В., Наумик В. В., Лунёв В. В. Процессы кристаллизации, структура и свойства отливок из никелевых жаропрочных сплавов. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2001. № 10. С. 13–17. [**НБД Scopus, Google Scholar**]
5. Tsvirko É. I., Zhemanyuk P. D., Klochikhin V. V., Naumik, V.V., Lunev V. V. Crystallization processes, structure and properties of castings from high-temperature nickel alloys. *Metal Science and Heat Treatment*. 2001. № 43(9-10). P. 382–386. [**Scopus; Web of Science; Google Scholar**]
6. Аникин Ю. Ф., Добкина Ю. Г., Ключихин В. В., Ладохин С. В., Жеманюк П. Д. Совмещенная индукционная и электронно-лучевая плавка литейных отходов жаропрочных сплавов ЖСЗДК и ЖС26-ВИ. *Проблемы специальной электрометаллургии*. 2002. № 2. С. 43–49. [**Scopus**]
7. Ажажа В. М., Ковтун Г. П., Ладыгин А. Н., Малыхин Д. Г., Рудычева Т. Ю., Свердлов В. Я., Тихоновский М. А., Щербань А. П., Жеманюк П. Д., Ключихин В. В. Микроструктура и свойства монокристаллов никелевого сплава НВ-4. Влияние условий кристаллизации на структуру и свойства. *Металлофизика и новейшие технологии*. 2002. Т. 24. № 11. С. 1525–1536. [**Web of Science; Google Scholar**]
8. Жеманюк П. Д., Лысенко Н. А., Ключихин В. В., Цивирко Э. И. Фазовые и структурные превращения при высокотемпературной обработке расплава жаропрочного сплава. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2003. № 1. С. 10–14.
9. Ажажа В. М., Свердлов В. Я., Ладыгин А. Н., Рудычева Т. Ю., Жеманюк П. Д., Лысенко Н. А., Ключихин В. В., Педаш А. А. Роль теплофизических условий в процессе формирования структуры при направленной кристаллизации жаропрочных сплавов на никелевой основе. *Вопросы атомной науки и техники*. Серия: Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники (14). 2004. № 6. С. 128–135. [**Google Scholar**]
10. Ажажа В. М., Свердлов В. Я., Кондратов А. А., Богуслаев А. В., Ключихин В. В. Влияние условий кристаллизации на макроскопический

фронт кристаллизации и структурное совершенство монокристаллов Ni-сплавов. *Вісник Харківського університету*. 2007. № 781. Випуск 3(35). С. 73–80. **[Google Scholar]**

11. Клочихин В. В., Цивирко Э. И. Исследование и разработка технологии рафинирования отходов жаропрочных сплавов для литья монокристаллических лопаток. *Вестник двигателестроения*. 2007. № 2. С. 102–105.

12. Наумик В. В., Клочихин В. В., Цивирко Э. И., Лунёв В. В. Влияние управляемой кристаллизации на структуру и свойства отливок из жаропрочных сплавов. *Литейное производство*. 2011. № 4 С. 13–16. **[Міжнародне видання]**

13. Богуслаев А. В., Клочихин В. В., Лысенко Н. А., Наумик В. В. Использование нанотехнологий в литейном производстве. *Вісник ДДМА*. 2011. № 4 (25). С. 23–28.

14. Жеманюк П. Д., Клочихин В. В., Лысенко Н. А., Наумик В. В. Разработка комплексной технологии получения ответственных отливок из жаропрочных никелевых сплавов. *Компрессорное и энергетическое машиностроение*. 2012. № 1 (27). С. 47–51.

15. Богуслаев, А. В., Клочихин В. В., Лысенко Н. А., Наумик В. В. Модифицирование жаропрочного сплава наночастицами углерода. *Литейное производство*. 2012. № 7. С. 10–13. **[Міжнародне видання]**

16. Клочихин В. В., Гнатенко О. В., Наумик В. В. Влияние высокотемпературной термовременной обработки на качество сплава ЖС32-ВИ. *Металлургия машиностроения*. 2013. № 3. С. 35–39. **[Міжнародне видання]**

17. Клочихин В. В., Жеманюк П. Д., Цивирко Э. И., Наумик В. В. Влияние температурного градиента на фронте кристаллизации на структуру жаропрочных никелевых сплавов ЖС32-ВИ и НВ-4. *Металл и литьё Украины*. 2014. № 7 (254). С. 24–28.

18. Жеманюк П. Д., Клочихин В. В., Лысенко Н. А., Гречанюк Н. И., Наумик В. В. Направленная кристаллизация отливок из возвратных отходов сплава ЖС26-ВИ, рафинированных электронно-лучевым переплавом. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2016. № 1. С. 40–46.

19. Клочихин В. В., Жеманюк П. Д., Наумик В. В. Об испытании турбинных лопаток на угол изгиба. *Металлургия машиностроения*. 2016. № 4. С. 50–51. **[Міжнародне видання]**

20. Клочихин В. В., Гречанюк Н. И., Смышляк Ю. А., Гречанюк И. Н., Наумик В. В. Структура и свойства слитков, полученных электронно-лучевым переплавом кондиционных возвратных отходов жаропрочного сплава ЖС26-ВИ. *Современная электрометаллургия*. 2017. №4. С. 17–27.

21. Клочихин В. В., Жеманюк П. Д., Гречанюк Н. И., Наумик В. В. Исследование качества материала слитков, полученных методом электронно-лучевого переплава из 100 % отходов сплава НВ-4. *Металл и литьё Украины*. 2018. № 1–2 (296 – 297). С. 16–21.

22. Klochikhin V., Naumyk V. Improvement of technological processes obtaining a heat-resistant nickel alloys for turbine blades using foundry return /

V.Klochikhin. *MS and T 2019 – Materials Science and Technology*. 2019. P. 1454–1458. [**Scopus; Index Copernicus; Eurasian Scientific Journal Index**]

23. Душейко В.А., Корчагина Л.И., Клочихин В.В., Цивирко Э.И. Влияние термовременной обработки расплава на структуру и свойства сплавов ЭИ437 и ЖСЗЛС. *Нові конструкційні сталі та стопи та методи їх обробки для підвищення надійності та довговічності виробів*: збірник наук. праць. Запоріжжя: ЗДТУ, 1998. С. 78–79.

24. Клочихин В. В., Лысенко Н. А., Коломойцев А. Г., Цивирко Э. И. Улучшение структуры и свойств отливок после ВТОР. *Повышение качества и экономичности литейных процессов*: материалы международной научно-технической конференции. Одесса: ОГПУ, 2000. С. 30–33.

25. Клочихин В. В., Жеманюк П. Д., Цивирко Э. И., Наумик В. В. Рафинирование сплава ЖСЗДК-ВИ высокотемпературной обработкой расплава. *Неметалеві включення і гази в ливарних сплавах*: збірник наукових праць IX міжнародної наук.-техн. конф. Запоріжжя: ЗДТУ, 2000. С. 38–40.

26. Клочихин В. В., Коломойцев А. Г., Бялик Г. А., Наумик В. В. Трещиностойкость отливок из жаропрочных никелевых сплавов. *Неметалеві включення і гази в ливарних сплавах*: збірник наукових праць IX міжнародної наук.-техн. конф. Запоріжжя: ЗДТУ, 2000. С.24–26.

27. Лысенко Н. А., Жеманюк П. Д., Клочихин В. В., Цивирко Э. И. Исследования новых механизмов структурного упрочнения жаропрочных сплавов. *Прогрессивные технологии и системы машиностроения*: Международный сб. науч. трудов. Донецк: ДонГТУ, 2001. Вып.17. С. 32–36.

28. Ажажа В.М., Горбенко Ю.В., Ковтун Г.П., Ладыгин А.Н., Мальхин Д.Г., Рудычева Т.Ю., Свердлов В.Я., Тихоновский М.А., Щербань А.П., Жеманюк П.Д., Коломойцев А.Г., Клочихин В.В. Структура монокристаллов никелевых сплавов НВ-4 и ЖС-32ВИ *Высокочистые металлические и полупроводниковые материалы*: сборник докладов 8-го Международного симпозиума (Харьков, 22-27 апреля, 2002). Харьков: ННЦ ХФТИ, 2002. С. 52–56.

29. Клочихин В. В., Цивирко Э. И., Лысенко Н. А., Жеманюк П. Д. Рафинирование сплава ЖС32-ВИ для отливок направленной кристаллизации. *Машиностроение и техносфера XXI века*: сборник трудов IX Международной науч.-техн. конференции (Севастополь, 9–15 сентября, 2002). Донецк: ДонНТУ, 2002. Т. 1. С. 249–253.

30. Ажажа В. М., Горбенко Ю. В., Жеманюк П. Д., Клочихин В. В. Влияние условий кристаллизации на структуру и механические свойства никелевого сплава ЖС32-ВИ. *Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов (Часть II)*: сборник докладов 3-й Международной конференции (Харьков, 9–13 сентября, 2002). Харьков: ННЦ ХФТИ, 2002. С. 39–42.

31. Клочихин В.В., Цивирко Э.И., Жеманюк П.Д., Лысенко Н.А., Мьяльница Г.Ф., Федотов Е.Н. Рафинирование литейных отходов никелевых жаропрочных сплавов методом низкотемпературного вакуумного переплава и направленной кристаллизации в печах ПМП-4М. *Специальная*

металлургия: вчера сегодня, завтра: Материалы Международной науч.-техн. конф. (8–9 октября 2002 г., г. Киев). К.: ИВЦ. Видавництво “Політехніка”, 2002. С. 68–72.

32. Ladokhin S. V., Anikin Yu. F., Zemanyuk P. D., Klochihin V.V. Innovation in Superalloys Melting for Gas Turbine Engines Casting Production. 65th World Foundry Congress: Proceedings of the 65th World Foundry Congress, Gyeongju, Korea, October 20–24, 2002. P. 1033–1036.

33. Клочихин В. В., Цивирко Э. И., Ладохин С. В. Рафинирование жаропрочных никелевых сплавов для литья лопаток методом направленной кристаллизации. *Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов (Часть II): сборник докладов 3-й Международной конференции (Харьков, 9–13 сентября, 2002).* Харьков: ННЦ ХФТИ, 2002. С. 42–45.

34. Клочихин В.В., Цивирко Э.И., Жеманюк П. Д., Лысенко Н. А. Высокотемпературный дифференциально-термический анализ сплава ЖС32-ВИ. *Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов (Часть II): сборник докладов 4-ой Международной конференции.* Харьков: ХАЭУ, 2003. С. 48–50.

35. Клочихин В. В., Лысенко Н. А., Жеманюк П. Д., Цивирко Э. И. Влияние различных способов рафинирования на структуру и свойства жаропрочных никелевых сплавов. *Машиностроение и техносфера XXI века: сборник трудов Международной науч.-техн. конф. (Севастополь, 8–14 сентября, 2003).* Донецк: ДонНТУ, 2003. Т. 2. С. 50–55.

36. Клочихин В. В., Цивирко Э. И. Исследование и разработка технологии рафинирования отходов жаропрочных сплавов для литья монокристаллических лопаток. *Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях: материалы 4-й ежегодной промышленной конференции с международным участием и выставки (п. Славское, Карпаты 2–7 февраля, 2004).* Киев: УИЦ "Наука. Техника, Технология", 2004. С. 154–157.

37. Klochihin V., Taran V., Tsivirko E., Vovk V. Refinement technology for heat resistant alloys wastes to cast monocrystal blades. 66th World Foundry Congress, 6–9 September, 2004. Istanbul, Turkey. P. 1495–1500.

38. Ажажа В. М., Свердлов В. Я., Ладыгин А. Н., Саенко С. Ю., Холomeев Г. А., Рудычева Т. Ю., Богуслаев А. В., Клочихин В. В., Лысенко Н. А. Исследование микроструктуры жаропрочных никелевых сплавов, прошедших баротермическую обработку. *Машиностроение и техносфера XXI века: Сборник трудов XIII международной научно-технической конференции (г. Севастополь, 11–16 сентября, 2006).* Донецк: ДонНТУ, 2006. С. 29–34.

39. Ажажа В. М., Свердлов В. Я., Ладыгин А. Н., Богуслаев А. В., Клочихин В. В., Лысенко Н. А. Получение монокристаллических изделий из жаропрочных суперсплавов на Ni-основе кристаллизационно-деформационным методом. *Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применение, экологически чистые технологии*

производства и утилизации изделий: труды четвертой международной конференции (Жуковка, Большая Ялта, 18–22 сентября, 2006). Жуковка, Большая Ялта, 2006. С. 143.

40. Ключихин В. В., Цивирко Э. И. Исследования и разработка технологии рафинирования отходов жаропрочных сплавов для литья монокристаллических лопаток. *Молодежь в авиации: новые решения и перспективные технологии*: тезисы докладов Международной молодежной научно-технической конференции (Алушта, 15–18 мая, 2007). Алушта, 2007. С. 244–245.

41. Гнатенко О. В., Ключихин В. В., Наумик В. В. Производство жаропрочного никелевого сплава с использованием возврата. *Перспективные технологии, материалы и оборудование в литейном производстве*: материалы II международной научно-технической конференции (Краматорск, 7–14 сентября, 2009). Краматорск: ДГМА, 2009. С. 56–57.

42. Жеманюк П. Д., Ключихин В. В., Лысенко Н. А., Наумик В. В. Производство жаропрочных никелевых сплавов из технологического литейного возврата. *Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра* [Електрон. ресурс]: матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції (Київ, 23 квітня 2013 р.). Київ: НТУУ «КПІ», 2013. С. 196–200.

43. Ключихин В. В., Гнатенко О. В., Наумик В. В. Влияния высокотемпературной термовременной обработки расплава (ВТОР) на качество сплава ЖС32-ВИ. *Прогрессивные технологии жизненного цикла авиационных двигателей и энергетических установок*: тезисы докладов X Международной научно-технической конференции (Алушта, 23–28 сентября, 2013). Запорожье: АО «Мотор Сич», 2013. С. 89–91.

44. Жеманюк П. Д., Ключихин В. В., Лысенко Н. А., Наумик В. В. Получение шихтовых заготовок жаропрочных никелевых сплавов из 100% литейного возврата. *Перспективные технологии, материалы и оборудование в литейном производстве*: материалы IV Международной научно-технической конференции (Краматорск, 30 сентября – 4 октября 2013 г.). Краматорск: ДГМА, 2013. С. 106–107.

45. Ключихин В. В., Жеманюк П. Д., Наумик В. В., Цивирко Е. И. Вдосконалення технологічних процесів отримання жароміцних нікелевих сплавів для лопаток турбін із використанням повернення. *Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра* [Електрон. ресурс]: матеріали XII Всеукраїнської науково-практичної конференції (Київ, 15 квітня 2014 р.). Київ: НТУУ «КПІ», 2014. С. 464–476.

46. Ключихин В. В., Наумик В. В. Отримання економічних відповідальних виливків з жароміцних нікелевих сплавів з використанням ливарного повернення. *Нові матеріали і технології в машинобудуванні – 2019* [Електрон. ресурс]: матеріали XI Міжнародної наук.-техн. конф. (Київ, 30–31 травня, 2019). Київ: НТУУ «КПІ», 2019. С. 93–94.

АНОТАЦІЯ

Ключихін В.В. «Матеріалознавчі основи процесів отримання жароміцних нікелевих сплавів для лопаток турбін з використанням технологічного звороту». Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – Матеріалознавство. – Національний університет «Запорізька політехніка» МОН України, м. Запоріжжя, 2020.

Дисертацію присвячено розвитку матеріалознавчих основ процесів отримання якісних жароміцних нікелевих сплавів із використанням технологічного звороту та застосуванням сучасних методів рафінування. В цих сплавах, а також в готових литих виробках, забезпечені механічні, технологічні та експлуатаційні властивості на рівні виробів з первинних матеріалів.

В результаті досліджень отримали подальший розвиток теоретичні уявлення про вплив температурного градієнту на фронт кристалізації нікелевих сплавів в умовах високошвидкісної спрямованої кристалізації (ВСК) та високотемпературне оброблення розплаву ливарних відходів. Вивчено кластерний механізм поведінки мікрогрупувань $Ti(C,N) \cdot Ni_3(Ti,Al)$ в умовах високотемпературної обробки розплаву при температурах вище 1800 °С. Випробувано у виробничих умовах та налагоджено серійне виробництво сплавів ЖС6К-ВІ, ЖС3ДК-ВІ, ЖС26-ВІ та ЖС32-ВІ з використанням в шихті до 100% технологічного звороту.

Ключові слова: жароміцний нікелевий сплав, виливок, технологічний зворот, термочасова обробка, спрямована кристалізація, макроструктура, реній, тантал, механічні властивості, довготривала міцність, високотемпературна корозія.

АННОТАЦИЯ

Ключихин В.В. «Материаловедческие основы процессов получения жаропрочных никелевых сплавов для лопаток турбин с использованием технологического возврата». Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.01 – Материаловедение. – Национальный университет «Запорожская политехника», МОН Украины, г. Запорожье, 2020.

Диссертация посвящена развитию материаловедческих основ процессов получения качественных жаропрочных никелевых сплавов с использованием технологического оборота и применением современных методов рафинирования. В этих сплавах, а также в готовых литых изделиях, обеспечены механические, технологические и эксплуатационные свойства на уровне изделий из первичных материалов.

Разработана методика испытания литых лопаток газотурбинных двигателей на угол загиба. Установлено, что наиболее надежной и экономичной технологией очистки поверхностных зон является дробеструйная обработка с последующей обдувкой электрокорундом и травлением.

Направленная кристаллизация никелевых сплавов по сравнению с объемной обеспечивает рафинирование сплава от таких вредных примесей как кислород, азот, железо, свинец, а также нитридных, карбонитридных и оксидных включений.

Низкотемпературный вакуумный переплав литейных отходов никелевых сплавов ЖС32-ВИ и ЖС26-ВИ на установке ПМП-4М позволяет свести к минимуму угар активных дорогостоящих легирующих (тантал, рений, ниобий и др.).

В процессе изучения влияния температурного градиента на фронт кристаллизации отливок из никелевых сплавов в условиях ВНК установлено, что повышенные скорости кристаллизации в сплаве галлия с индием обеспечивают плоский фронт кристаллизации и снижают вероятность образования структурных дефектов, что повышает их трещиностойкость и другие свойства.

При высокотемпературной обработке расплава заметно улучшалась его однородность, в результате чего кристаллизации металла начиналась при большем переохлаждении, обеспечивалось измельчение структурных составляющих, снижалось развитие ликвационных процессов и существенно улучшались свойства отливок.

Изучен кластерный механизм поведения микрогруппировок $Ti(C,N) \cdot Ni_3(Ti,Al)$ и им подобных в условиях повышения температур высокотемпературной обработки расплава (ВТОР), когда при температурах выше 1800 °С эти микрогруппировки начинали дробиться и разрушаться, интенсивно теряя азот, и по составу приближаться к карбидам. С уменьшением времени выдержки при ВТОР микрогруппировки не успевали потерять оболочки из динамических кластеров, что блокировало развитие зародышей кристаллов γ -фазы и приводило к переохлаждению расплава.

Комбинированный метод рафинирования литейных отходов сплавов ЖС26 и ЖС32 (ВИП+ЭЛП) позволил получить шихтовую заготовку без угара активных легирующих элементов, плотной и однородной структурой, с незначительным развитием ликвационных и усадочных процессов. Установлено, что изменяя мощность электронного луча можно повышать эффективность рафинирования литейных отходов.

В вакуумной плавильной установке «ULVAC» FM-1-2-100 опробовано в производственных условиях и налажено производство сплавов ЖС6К-ВИ,

ЖСЗДК-ВИ, ЖС26-ВИ и ЖС32-ВИ с использованием в шихте до 100 % литейного возврата.

Ключевые слова: жаропрочный никелевый сплав, технологический возврат, термовременная обработка, направленная кристаллизация, макроструктура, механические свойства, длительная прочность, высокотемпературная коррозия.

SUMMARY

Klochikhin V.V. «Material science bases of heat-resistant nickel alloys obtaining processes for turbine blades using technological return». Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation is intended for a candidate degree in engineering science by specialty 05.02.01 – Materials science. – National University «Zaporizhzhia Polytechnic», Ministry of Education and Science of Ukraine, Zaporizhzhia, 2020.

The dissertation is devoted to solving an important scientific and practical task – the development of materials bases of processes of obtaining high - quality heat - resistant nickel alloys with the use of technological return and application of modern methods of refining. In these alloys, as well as in finished cast products, mechanical, technological and operational properties are provided at the level of products made of primary materials.

As a result of the research, theoretical ideas about the influence of the temperature gradient on the crystallization front of nickel alloys under conditions of high-speed directional crystallization was further developed. Theoretical ideas about high-temperature treatment of foundry melt were further developed. The cluster mechanism of $Ti(C,N) \cdot Ni_3(Ti,Al)$ microgroups behavior in the conditions of high-temperature processing of the melt at temperatures above 1800°C has been studied. Tested in production conditions and production of Zh6K-VI, ZhS3DK-VI, ZhS26-VI and ZhS32-VI alloys using in the charge up to 100% foundry return.

Keywords: heatproof nickel alloy, technological return, heart-time treatment, directed crystallization, macrostructure, mechanical properties, prolonged durability, high temperature corrosion.

Підписано до друку 19.06.2020р.
Формат 60х90/16. Умов. друк. арк. 0,9. Обл.-вид. арк. 0,9.
Тираж 100 прим. Зам.1613

АТ «МОТОР СІЧ»
69068, м. Запоріжжя, пр. Моторобудівників, 15
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і
розповсюджувачів видавничої продукції
сер. ДК № 4213 від 22.11.2011