

До спеціалізованої
вченої ради Д 17.052.01 при
національному університеті
«Запорізька політехніка»

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Клочихіна Володимира Валерійовича

«Матеріалознавчі основи процесів отримання жароміцних нікелевих сплавів для лопаток турбін з використанням технологічного звороту»,

представлену на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

за спеціальністю 05.02.01 – «Матеріалознавство».

Актуальність теми дисертаційної роботи.

Подана до захисту дисертаційна робота Клочихіна В.В. присвячена вирішенню важливої науково-технічної проблеми – отримання жароміцних нікелевих сплавів для лопаток газотурбінних двигунів при повторному використанні в шихті технологічного звороту за рахунок застосування різних 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. Вирішення цієї проблеми нероздільно пов'язано з питаннями розвитку матеріалознавства, а саме зі створенням нових та удосконаленням існуючих технологій та матеріалів, які окрім необхідних фізико-механічних і технологічних характеристик мали б високий рівень спеціальних функціональних властивостей, що здатні суттєво підвищити надійність та довговічність об'єктів сучасної техніки.

Розвиток новітніх технологій передбачає підвищення якості деталей сучасного устаткування, приладів, машин, механізмів тощо, при зниженні їх собівартості. Одним з шляхів зниження вартості виливків з жароміцних нікелевих сплавів є використання в шихті технологічного звороту. Як свідчить досвід вітчизняного і

зарубіжного виробництва закономірності, які забезпечують ефективність його застосування вивчені недостатньо.

Перелічені аргументи стали підставою для постановки науково-технічного завдання з метою розвитку матеріалознавчих аспектів в процесах отримання якісних жароміцних нікелевих сплавів із використанням технологічного звороту, та застосуванням сучасних методів рафінування, а також забезпечення в них і в готових литих виробах механічних, технологічних та експлуатаційних властивостей на рівні виробів з первинних матеріалів.

Вирішення поставленого завдання має вагоме, як наукове, так і практичне значення.

Вищенаведене характеризує тему дисертаційної роботи, що рецензується, як актуальну і підтверджує відповідність дисертації Клочихіна В.В. встановленим вимогам за ознакою "актуальність обраної теми дисертації".

Зв'язок дисертаційної роботи з державними науковими програмами, планами, темами, пріоритетними напрямками розвитку науки і техніки.

Дисертаційна робота пов'язана з виконанням робіт, що відповідають пріоритетним напрямкам розвитку науки і техніки, які сформульовані в Законі України "Про пріоритетні напрямки розвитку науки і техніки" від 11.07.2011 року № 2623 – III, а також з роботами національного університету "Запорізька політехніка" з АТ "Мотор Січ": Дослідження та розробка технології виробництва лопаток спрямованої кристалізації з використанням зворотних відходів сплавів ЖС32-В1 і ЖС26-В1 (№ 4612 від 2002 року), «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 авіацій-

ного 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).

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, їх достовірність.

Обґрунтованість результатів, одержаних у дисертаційній роботі Ключихіна В.В., забезпечена використанням для їх отримання широкого інструментарію сучасних методів досліджень та відповідного обладнання. В роботі застосовувались методи хімічного, металографічного, електронномікроскопічного і математичного аналізів, визначення мікротвердості, що дають надійні і взаємоузгоджені дані про фазовий, хімічний склад та залежності зміни якісних показників досліджуваних сплавів. Оцінка обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечується узгодженістю отриманих експериментальних і виробничих даних за загально прийнятими уявленнями про використання при виплавці жароміцних нікелевих сплавів в шихті ливарного звороту, про застосування різних технологічних процесів і методів рафінування та закономірностях їх впливу на структуру, фізико-механічні, жароміцні та експлуатаційні властивості; оцінкою похибок отриманих результатів і залежностей, та апробацією результатів досліджень у виробничих умовах, про що свідчать акти впровадження, наведені у "Додатках" до дисертації.

Наукова новизна одержаних результатів.

У роботі отримано ряд нових результатів, що становлять наукову новизну дисертаційного дослідження, серед яких слід виділити наступні найголовніші:

1. Важливим надбанням дисертації є те, що вперше вивчено кластерний механізм поведінки мікроугруповань $Ti(C,N)$, $Ni_3(Ti,Al)$ та подібних їм в умовах підвищення температур високотемпературної обробки розплаву.

2. Отримали подальший розвиток наукові та технологічні уявлення про особливості рафінування технологічного звороту в процесі спрямованої кристалізації.
3. Суттєвим є подальший розвиток теоретичних уявлень про вплив температурного градієнту на фронт кристалізації нікелевих сплавів в умовах високошвидкісної спрямованої кристалізації.
4. Розвинені теоретичні уявлення про високотемпературне оброблення розплаву ливарних відходів.
5. Важливим здобутком дисертанта є подальший розвиток технологічних уявлень про комплексне рафінування ливарних відходів у процесі вакуумного індукційного та електронно-променевого переплавів.

Одержані результати, опираючись на теоретичні аспекти матеріалознавства, дозволяють стверджувати, що в якісних жароміцних нікелевих сплавах, які отримують з використанням технологічного звороту при застосуванні сучасних методів рафінування, а також в литих виробах забезпечені механічні, технологічні і експлуатаційні властивості на рівні аналогічних, що були отримані за існуючими технологіями.

Повнота опублікованих результатів дисертації.

Основний зміст дисертації Клочихіна В.В. опубліковано у 46 друкованих роботах. Серед них 22 опубліковано у фахових наукових виданнях, з яких 9 входять до науково метричних баз даних, 24 тези доповідей на міжнародних науково-технічних конференціях.

Загалом положення стосовно повноти публікацій та апробацій роботи виконано у повному обсязі.

Оцінка змісту роботи.

Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, додатків та списку використаних джерел із 170 найменувань. Загальний обсяг роботи складається із 205 сторінок, 62 рисунків та 39 таблиць.

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета, завдання і методи дослідження, наукова новизна, визначена практична значимість, наведені відомості про апробацію та публікацію основних результатів дисертації.

Перший розділ містить огляд технічної літератури з питань існуючих технологічних процесів отримання жароміцних нікелевих сплавів для лопаток газотурбінних двигунів. На основі аналізу умов експлуатації встановлений необхідний рівень механічних властивостей матеріалу лопаток турбін.

Показано, що існує велика кількість робіт, присвячених застосуванню нових сплавів із шихти зі зворотними відходами. Огляд дисертантом технічної літератури з питань використання в шихті технологічного звороту, процесів і методів рафінування та вимог до матеріалу і литих виробів стосовно фізико-механічних, жароміцних і експлуатаційних властивостей свідчить про необхідність проведення спеціальних досліджень. Виконаний автором дисертації аналітичний огляд літературних вітчизняних і закордонних джерел, проведений його глибокий аналіз є змістовним і цікавим з наукової точки зору.

У другому розділі дисертант зосереджується на розробленні апаратно-методичних засад одержання та дослідження матеріалів.

Важливим і ґрунтовним, на нашу думку, є обрані методики досліджень, які включають як відомі стандартні методи, так і оригінальні дослідження, з відносною похибкою не більше 5 %.

Загалом цей розділ дисертації характеризує здобувача як дослідника, який володіє широким інструментарієм тонких експериментальних методів досліджень і здатний ґрунтовно інтерпретувати одержані результати.

Третій розділ дисертації присвячений дослідженню процесів рафінування технологічного звороту нікелевих сплавів. За результатами проведених досліджень встановлено, що надійне очищення ливарних відходів відбувається за такою технологією: дробеструменева обробка з наступним обдуванням електрокорундом і тра-

вленням в реактиві при температурі 25 °С протягом 0,5 години. Комбінований метод рафінування ливарних відходів сплавів ЖС26 і ЖС32 (ВІП + ЕПП) дозволив отримати шихтову заготовку без угару активних легувальних елементів, зі щільною й однорідною структурою, з незначним розвитком ліквацийних і усадочних процесів. Встановлено, що змінюючи потужність електронного променя можна підвищувати ефективність рафінування ливарних відходів.

При вивченні впливу температурного градієнта на фронт кристалізації виливків з нікелевих сплавів в умовах ВСК виявлено, що підвищення швидкості кристалізації в сплаві галію з індієм забезпечили плоский фронт кристалізації і зменшили ймовірність утворення структурних дефектів. Останнє позитивно позначилось на тріщиностійкості виливків і помітно підвищило їх властивості.

При високотемпературній обробці розплаву з відходів ряду нікелевих сплавів мав місце угар практично усіх легувальних елементів, особливо зі збільшенням тривалості витримки. Вміст азоту в сплавах істотно знижувався. Помітно поліпшилась однорідність розплаву, що сприяло початку кристалізації металу при більшому переохолодженні, забезпечило подрібнення структурних складових, зменшило розвиток ліквацийних процесів і суттєво покращувало властивості виливків.

Одержані в межах цього дослідження експериментальні результати заслуговують на увагу і позитивну оцінку.

У четвертому розділі роботи дисертант концентрує свою увагу на результатах проведених досліджень і розроблених технологічних рекомендацій для серійного 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, ЖС3ДК-ВІ, ЖС26-ВІ та ЖС32-ВІ з використанням в шихті до 100 % технологічного звороту, які повністю відповідають вимогам нормативно-технологічної документації.

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 із щільною і однорідною структурою, з незначним розвитком ліквідаційних та усадочних процесів.

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

Зазначені факти показують важливість одержаних коректних результатів і висновків не тільки у науковому, але і у прикладному плані.

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.).

У **додатках** наведено технічну документацію – акти впровадження результатів дисертаційного дослідження у виробництво на підприємствах галузі та у навчальний процес при викладанні спеціалізованих дисциплін.

Значення результатів роботи для науки і практики.

Цінність для науки і практики дисертаційного дослідження Ключихіна В.В. полягає в тому, що дисертантом вперше було науково обґрунтовано і сформульовано нову концепцію одержання якісних виливків жароміцних нікелевих сплавів з використанням технологічного звороту, що зберігає рівновісну та спрямовану мікроструктуру, властивості, які задовольняють всім вимогам нормативно-технічної документації.

Спрямована кристалізація зливків діаметром 80 мм зі сплавів ЖС32-ВІ, ЖС26-ВІ, ВЖЛ12У-ВІ в умовах знижених температур (не більше 1455 °С на уста-

новці ПМП-4М) забезпечила мінімальний угар активних дорогих легувальних елементів (тантала, ренія, ніобія і ін.), очищення металу від оксидних плівок, шлакових включень та отримання необхідної щільної структури.

Підвищення швидкості кристалізації в сплаві галію з індієм забезпечило плоский фронт кристалізації і зменшило вірогідність утворення структурних дефектів, внаслідок чого підвищились їх тріщиностійкість та інші властивості.

Розроблений метод випробувань 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".

Вельми важливим, з нашої точки зору, є результати промислової апробації і рекомендації щодо практичного застосування здобутків дисертаційної роботи із значним очікуваним економічним ефектом.

Усі виконані дослідження відрізняються широтою і багатогранністю, глибокою аналізу, застосуванням при проведенні експериментів найновітніх методик і обладнання.

Зауваження по дисертації.

1. У першому розділі дисертації забагато уваги приділяється обзору літератури з питань технологічних та апаратних особливостей одержання жароміцних нікелевих сплавів для лопаток газотурбінних двигунів при повторному використанні технологічного звороту і недостатньо висвітлюються матеріалознавчі питання вирішення цієї проблеми.
2. Автором розроблена методика випробування литих лопаток газотурбінних двигунів на кут загину, але не наведені підтвердження новизни цього способу. Опис приведеної методики слід було б віднести у дослідницьку частину дисертації.
3. У четвертому розділі, присвяченому промислому впровадженню у виробництво сплавів ЖС26-ВІ і ЖС32-ВІ з використанням 50 % технологічного

звороту, в численних таблицях наведені результати великого об'єму проведених досліджень кожного зі сплавів. Доцільно було б відобразити одержані результати у графічному виконанні із порівнянням властивостей одержаних матеріалів між собою і з властивостями серійних жароміцних сплавів.

4. Слід було більш чітко вказати, в яких випадках доцільно використовувати 50 %, а де 100 % технологічного звороту жароміцних нікелевих сплавів в шихті.
5. Треба зазначити деякі недосконалості в оформленні роботи та наявність помилок, наприклад:
 - табл. 1.4 с. 42 стосовно Cr - це "шматок" а не "шток";
 - рис. 3.28 с. 137 - мабуть, мається на увазі мікроструктура сплаву ЖС26-ВІ, що була отримана в процесі високошвидкісної спрямованої кристалізації;
 - на рис 3.5, 3.16 не зазначено збільшення;
 - деякі збільшення вказані не зовсім коректно, наприклад, збільшення рис. 3.6, в у порівнянні з рис. 3.7 в, г (x200), рис. 3.11, 3.12 (x200) збільшення визивають сумніви.
6. Додатки А, Б, В дисертації наведені не державною мовою.

Однак, зроблені вище зауваження ні якою мірою не знижують загальної позитивної оцінки дисертації в цілому і її значення для науки та виробництва.

Матеріал у роботі викладено послідовно, грамотно, логічно, розділи взаємопов'язані і повністю розкривають поставлену в роботі мету.

За змістом дисертація відповідає паспорту спеціальності 05.02.01 – Матеріалознавство.

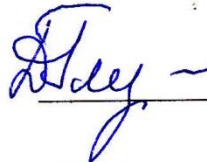
Автореферат дисертації повністю відповідає основним положенням дисертації.

Висновки щодо відповідності дисертації вимогам Міністерства освіти і науки України.

За актуальністю, обсягом проведених експериментальних досліджень, їх науковою та практичною новизною, дисертація **Клочихіна Володимира Валерійовича** на тему «Матеріалознавчі основи процесів отримання жароміцних нікелевих

сплавів для лопаток турбін з використанням технологічного звороту» є завершеним науковим дослідженням, відповідає вимогам п. п. 9, 10, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567 зі змінами МОН України № 656 від 29.08.2015 р. щодо кандидатських дисертацій, а її автор - **Клочихін Володимир Валерійович** заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – «Матеріалознавство».

Офіційний опонент
професор, доктор технічних наук,
завідувач кафедри технології металів
та матеріалознавства Харківського
національного автомобільно-
дорожнього університету

 Д.Б. Глушкова

