

## **ВІДГУК**

офіційного опонента на дисертаційну роботу

**Наумик Олени Олександрівни**

на тему «**Вдосконалення технології виготовлення литих деталей для авіаційного та енергетичного машинобудування**»,

представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань

**13 Механічна інженерія за спеціальністю 136 Металургія**

### **Актуальність теми дисертації.**

Розробка сучасних силових агрегатів для авіаційного та енергетичного машинобудування вимагає покращення рівня фізико-механічних, жароміцних і експлуатаційних властивостей матеріалів для виготовлення відповідальних виливків та забезпечення економічної конкурентоспроможності готових виробів. Логічною є задача підвищення рівня властивостей сучасних жароміцних нікелевих сплавів шляхом не подальшого ускладнення і без того перенасиченої системи легування, а за рахунок застосування і удосконалення сучасних технологічних процесів як на етапі виплавлення вже відомих сплавів, так і при подальшій обробці готових литих виробів.

Таким чином, **актуальною** є науково-практична задача вдосконалення технологічних процесів виплавлення ливарних жароміцних нікелевих сплавів, в тому числі при використанні в шихті власних ливарних кондиційних відходів та з застосуванням різних методів модифікування, а також подальшого використання сучасних методів технологічного покращення структури та властивостей готових виливків, в тому числі гарячого ізостатичного пресування (ГІП).

### **Оцінка обґрунтованості наукових результатів, їх достовірності та новизни.**

Сутність наукової новизни отриманих результатів дисертації полягає у наступному:

1. Вперше з застосуванням відомих методик проведено комплекс розрахунково-аналітичних досліджень та визначено найважливіші параметри, що характеризують структурну і фазову стабільність та працездатність ливарного жароміцного нікелевого сплаву ЖСЗДК-ВІ на різних рівнях легування.

Раніше такі дані мали фрагментарний характер. Отримано основні розрахункові температурні параметри, кількість основної зміцнюючої  $\gamma'$ -фази, границя короткочасної і тривалої міцності жароміцного нікелевого сплаву ЖСЗДК-ВІ на різних рівнях легування. Розрахункові показники відповідають відомим практичним результатам досліджень та рівню вимог ОСТ 1.90.126-85 до сплаву ЖСЗДК-ВІ.

Отримані результати свідчать про стабільність сплаву ЖСЗДК-ВІ та його загальну придатність для широкого застосування, модифікування різними комплексами для подальшого покращення рівня фізико-механічних та експлуатаційних властивостей, підтверджують коректність застосованих

параметрів температури і тиску в процесі ГП і термічної обробки (ТО) сплаву ЖСЗДК-ВІ.

2. Отримали подальший розвиток науково-практичні уявлення про можливості використання ливарних кондиційних відходів в шихті при виплавленні жароміцного нікелевого сплаву ЖСЗДК-ВІ.

Показано, що якість виливків із жароміцного нікелевого сплаву ЖСЗДК-ВІ, отриманих з використанням у шихті 50%-вого вороття (після попереднього переплаву із застосуванням високотемпературної обробки розплаву), після ГП та термічної обробки за стандартним режимом відповідає вимогам ОСТ 1.90.126-85.

У процесі ГП лопаток при температурі 1210°C і тиску 160 МПа відбувається заліковування мікропор і рихлот, що не виходять на поверхню деталей (знаходяться у внутрішніх об'ємах металу). ГП перед стандартною ТО позитивно впливає на комплекс фізико-механічних та експлуатаційних властивостей відповідальних литих виробів із жароміцних нікелевих сплавів для авіаційних і енергетичних силових установок.

3. Отримали подальший розвиток науково-практичні уявлення про можливості застосування різних видів модифікування при виплавленні жароміцного нікелевого сплаву ЖСЗДК-ВІ.

Досліджено вилівки з жароміцного нікелевого сплаву ЖСЗДК-ВІ, модифікованого ультрадисперсним порошком карбонітриду титану; ітрієм; ітрієм у комплексі з карбонітридом титану або ніобієм при різних співвідношеннях присадок у розплав Ni-Y лігатури, [Ti+Ti(C,N)] і Nb. Хімічний склад, механічні та жароміцні властивості досліджуваних зразків після ГП та стандартної ТО задовільні та відповідають вимогам ОСТ 1.90.126-85. Мікроструктура зразків, відлитих зі сплаву ЖСЗДК-ВІ за всіма варіантами (після ГП та ТО), характерна для термообробленого стану сплаву ЖСЗДК-ВІ. Карбіди та карбонітриди виділяються у вигляді дискретних глобулярних частинок, рівномірно розподілених в об'ємі металу.

Встановлено найкращий ефект від комплексного модифікування ітрієм і карбонітридом титану з присадками у розплав [Ti+Ti(C,N)] – 0,075 % і Ni-Y лігатури – 0,136 %, що забезпечує формування найбільш сприятливої структури і значно кращі механічні та жароміцні властивості нікелевого сплаву ЖСЗДК-ВІ. В цьому випадку спостерігається подрібнення зерна, карбіди та карбонітриди виділяються у вигляді дискретних глобулярних частинок, рівномірно розподілених в об'ємі металу; межі зерен тонкі з наявністю на межах карбідів розміром, що переважно, не перевищує ~3 мкм. Це, ймовірно, сприяло підвищенню ударної в'язкості до значень 58,8 Дж/см<sup>2</sup>.

Проведене на ДП «Івченко Прогрес» (акт від 05.11.2025 р.) дослідно-промислове випробовування дозволяє рекомендувати комплексне модифікування нікелевого жароміцного сплаву ЖСЗДК-ВІ ітрієм і карбонітридом титану (з означеними присадками у розплав) при виробництві відповідальних виливків деталей авіаційних двигунів, а також газотурбінних енергоустановок.

## **Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності. Мова та стиль викладення результатів.**

Дисертаційна робота Наумик Олени Олександрівни написана українською мовою.

Робота відзначається логічною структурою, послідовністю викладу матеріалу, узгодженістю методичних підходів та чітким науковим стилем. Охоплено всі ключові етапи – від аналізу літератури до практичної апробації технології. Дисертація викладена на 122 сторінках, складається зі вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел з 116 найменувань, 2 додатків. Робота містить 35 рисунків, 23 таблиці.

Принципи академічної доброчесності дотримано: результати супроводжені достовірними посиланнями, основна частина матеріалів оприлюднена в рецензованих виданнях та представлена на конференціях. Авторка чітко декларує власний внесок, а використання літературних джерел є обґрунтованим і коректним.

### **Вступ**

Вступ дисертації витриманий у класичному стилі кваліфікаційних робіт: логічний, структурно чіткий, академічно обґрунтований. У ньому авторка обґрунтовує актуальність теми дослідження, його з науковими програмами, планами темами; формулює мету і завдання дисертаційної роботи, Об'єкт і предмет дослідження; коротко описує методи досліджень; формулює наукову новизну та практичне значення одержаних результатів; окреслює свій особистий внесок; доводить достатність наявних публікацій за темою та апробації дисертаційної роботи.

Усі формулювання чіткі, логічно пов'язані, без стилістичних помилок. Мова не ускладнена, однак вимагає фахового розуміння предмету дослідження. Загалом вступ добре орієнтований на цільову аудиторію – фахівців у галузі металургії, і слугує надійною основою для сприйняття наступних розділів.

### **Розділ 1. Сучасні матеріали і технологічні процеси виготовлення литих деталей для авіаційного та енергетичного машинобудування.**

Розділ присвячено ретельному літературному огляду та аналізу існуючих матеріалів, що застосовуються для виготовлення лопаток ГТД.

Авторка наводить загальну характеристика сучасних жароміцних нікелевих сплавів для авіаційного та енергетичного машинобудування, розглядає особливості застосування технологічних операції високотемпературної обробки розплаву та модифікування жароміцних нікелевих сплавів, методів технологічного покращення структури та властивостей готових виливків.

Окрему увагу приділено питанням використання в шихті власного технологічного вороття.

Розділ є чітко структурованим, з поділом на підрозділи, що полегшує орієнтацію в матеріалі. Стиль викладення зрозумілий, логічний технічно грамотний.

### **Розділ 2. Матеріали та методики досліджень.**

Наведено відомості про обраний матеріал досліджень – жароміцний нікелевий сплав ЖСЗДК-ВІ, описано застосовані в процесі досліджень

методики.

В роботі для визначення найважливіших параметрів, що характеризують структурну і фазову стабільність та працездатність ливарного жароміцного нікелевого сплаву ЖСЗДК-ВІ на різних рівнях легування, застосували відомі розрахунково-аналітичні методи, в тому числі розроблену в НУ «Запорізька політехніка» комплексну методику.

Плавки жароміцних нікелевих сплавів проводили на вакуумній установці типу УППФ-3М із застосуванням сучасних процесів високотемпературної обробки розплаву і модифікування.

За допомогою стандартних методик досліджували хімічний склад, вивчали зовнішній вигляд, макро- і мікроструктуру, фізико-механічні властивості, тривалу міцність матеріалу дослідних лопаток і зразків. Провели випробовування лопаток на згин.

Механічні та жароміцні властивості зразків визначали після ГПІ та ТО за стандартним режимом. Відносна похибка складала не більше 5 %.

### **Розділ 3. Розрахунок структурної стабільності сплаву ЖСЗДК-ВІ.**

З використанням відомих методик проведено комплекс розрахунково-аналітичних досліджень та визначено найважливіші параметри, що характеризують структурну і фазову стабільність та працездатність ливарного жароміцного нікелевого сплаву ЖСЗДК-ВІ. Визначено основні температурні параметри, кількість основної зміцнюючої  $\gamma'$ -фази, границя короточасної і тривалої міцності жароміцного нікелевого сплаву ЖСЗДК-ВІ на різних рівнях легування. Отримані розрахункові показники відповідають рівню вимог ОСТ 1.90.126-85 та відомим практичним результатам досліджень сплаву ЖСЗДК-ВІ.

Отримані результати свідчать про стабільність сплаву ЖСЗДК-ВІ та його загальну придатність для широкого застосування модифікування різними комплексами для покращення рівня фізико-механічних та експлуатаційних властивостей. Також результати, наведені у 3 розділі, підтверджують стабільність властивостей сплаву ЖСЗДК-ВІ та його технологічну придатність до модифікування різними комплексними добавками. Застосування модифікування забезпечує можливість цілеспрямованого підвищення рівня фізико-механічних і експлуатаційних характеристик сплаву.

Підтверджено коректність застосованих параметрів температури і тиску в процесі гарячого ізостатичного пресування та термічної обробки сплаву ЖСЗДК-ВІ.

### **Розділ 4. Виготовлення лопаток зі сплаву ЖСЗДК-ВІ з 50%-вим вороттям у шихті.**

Результати проведених досліджень показали, що якість матеріалу робочих лопаток і зразків, отриманих литтям із жароміцного нікелевого сплаву ЖСЗДК-ВІ із використанням у шихті 50 % вороття (після попереднього переплаву з високотемпературною обробкою розплаву), після гарячого ізостатичного пресування та подальшої термічної обробки за стандартним режимом відповідає встановленим нормативним вимогам.

Мікроструктура лопаток являє собою  $\gamma$ -твердий розчин, зміцнений інтерметалідною  $\gamma'$ -фазою, з наявністю карбідів і карбонітридів, відповідає

структурі сплаву ЖСЗДК-ВІ у термообробленому стані та прийнятій шкалі мікроструктур.

У процесі ГП лопаток при температурі 1210 °С і тиску 160 МПа відбувається заліковування мікропор і рихлот, що не виходять на поверхню деталей (знаходяться у внутрішніх об'ємах металу). Розмір виявлених після ГП одиничних мікропор більш ніж у 40 разів менший порівняно з порами в литих лопатках до проведення ГП.

Механічні та жароміцні властивості досліджених зразків задовільні та відповідають вимогам ОСТ 1.90.126-85. Величина кута згину досліджених лопаток знаходяться в межах 88...126°.

Проведені дослідження підтверджують можливість використання в шихті 50%-вого вороття (після попереднього переплаву з високотемпературною обробкою розплаву) під час виготовлення робочих лопаток турбін. Гаряче ізостатичне пресування перед стандартною термічною обробкою позитивно впливає на комплекс фізико-механічних та експлуатаційних властивостей відповідальних литих виробів із жароміцних нікелевих сплавів для авіаційних і енергетичних силових установок.

#### **Розділ 5. Модифікування ливарного жароміцного сплаву ЖСЗДК-ВІ.**

Проведено комплекс досліджень впливу різних видів модифікування при виплавленні жароміцного нікелевого сплаву ЖСЗДК-ВІ на структуру і властивості відповідальних литих виробів.

Досліджено вилівки з жароміцного нікелевого сплаву ЖСЗДК-ВІ, модифікованого ультрадисперсним порошком карбонітриду титану, ітрієм, а також комплексними присадками ітрію з карбонітридом титану або ніобієм при різних співвідношеннях добавок у розплаві Ni–Y лігатури, [Ti+Ti(C,N)] та Nb. Встановлено, що хімічний склад, жароміцні властивості досліджуваних зразків після гарячого ізостатичного пресування (ГП) та стандартної термічної обробки відповідають нормативним вимогам. Мікроструктура зразків, отриманих литтям зі сплаву ЖСЗДК-ВІ за різними варіантами модифікування (після проведення ГП та ТО), є типовою для даного сплаву у термообробленому стані. За показниками механічних властивостей дослідні комплексно модифіковані зразки суттєво переважають інші і відповідають більш жорстким вимогам розробників авіаційних двигунів для матеріалу литих лопаток вентилятора.

У результаті досліджень встановлено, що найбільш ефективним є комплексне модифікування розплаву ітрієм та карбонітридом титану при введенні присадок [Ti+Ti(C,N)] у кількості 0,075 % і Ni–Y лігатури – 0,136 %. Такий склад модифікаторів сприяє формуванню оптимальної мікроструктури та забезпечує суттєве підвищення механічних і жароміцних властивостей нікелевого сплаву ЖСЗДК-ВІ. За цих умов спостерігається подрібнення зеренної структури, а карбіди та карбонітриди виділяються у вигляді дискретних глобулярних частинок, рівномірно розподілених в об'ємі металу. Межі зерен характеризуються малою товщиною, при цьому на них формуються карбіди, розмір яких переважно не перевищує приблизно 3 мкм. Сформована таким чином структура, ймовірно, зумовлює підвищення ударної в'язкості матеріалу.

### **Загальні висновки.**

Зміст висновків охоплює всі ключові моменти проведеного комплексу досліджень.

Основний загальний висновок полягає в досягненні поставленої мети дослідження. За рахунок узагальнення сучасних науково-прикладних уявлень удосконалено технологічні процеси отримання відповідальних виливків для авіаційного та енергетичного машинобудування із жароміцного нікелевого сплаву ЖСЗДК-ВІ із застосуванням високотемпературної обробки розплаву і модифікування, в тому числі із використанням в шихті технологічного вороття, що в комплексі з гарячим ізостатичним пресуванням і подальшою термічною обробкою готових литих виробів забезпечить їх фізико-механічні, жароміцні і експлуатаційні властивості, а також економічні показники на рівні світових аналогів та вище.

Подано рекомендації щодо промислового застосування. Загальні висновки свідчать про високу якість проведеної роботи й важливе прикладне значення отриманих результатів.

### **Оприлюднення результатів дисертаційної роботи.**

Результати дисертаційної роботи опубліковано у 16 друкованих працях, в тому числі: у 4 виданнях, що індексуються у міжнародних науково-метричних базах Scopus та Web of Science; у 4 фахових виданнях; у 8 тезах доповідей на міжнародних науково-технічних та науково-практичних конференціях, 2 з яких індексуються у науково-метричній базі даних Scopus. Оприлюднення охоплює всі основні аспекти роботи.

У процесі створення дисертації авторка керувалася нормами наукової доброчесності. Представлені нею дослідницькі матеріали опираються на надійні джерела і демонструють результати самостійно проведеної роботи. Всі положення та висновки, що виносяться на публічний захист, є особистим надбанням здобувача.

### **Недоліки та зауваження.**

1. У тексті дисертації трапляються окремі випадки непослідовності у вживанні термінології, що ускладнює сприйняття. Наявні стилістичні неточності і орфографічні помилки.

2. Бажано було б навести конкретні дані про тривалість експлуатації обраних для дослідження литих лопаток зі сплаву ЖСЗДК-ВІ, виготовлених за серійною технологією. Яка кількість означених виробів використовується при виготовленні турбіни силового агрегату?

3. Бажано б було більше уваги приділити механізму впливу високотемпературної обробки розплаву на формування  $\gamma$ -матриці та структурних компонентів жароміцних сплавів.

4. В роботі чітко не висвітлено, які саме недоліки серійної технології вдалося подолати в процесі її вдосконалення.

Незважаючи на наведені зауваження, вони не є критичними та не применшують загальну наукову новизну і практичну значимість отриманих результатів, а також не змінюють загального схвального враження від

дисертаційної роботи, поданої на здобуття ступеня доктора філософії.

### Висновок про дисертаційну роботу

Дисертаційна робота Олени НАУМИК на тему «Вдосконалення технології виготовлення литих деталей для авіаційного та енергетичного машинобудування» є завершеним, самостійним, комплексним науковим дослідженням, яке зробило суттєвий внесок у розвиток галузі лиття жароміцних сплавів. У роботі обґрунтовано і запропоновано до використання вдосконалений технологічний процес виготовлення відповідальних виливків для авіаційного і енергетичного машинобудування з жароміцного нікелевого сплаву ЖСЗДК-ВІ, що передбачає високотемпературну обробку розплав, застосування комплексного модифікування ітрієм і карбонітридом титану, гаряче ізостатичне пресування та подальшу термічну обробку готових виливків за стандартним режимом. Результати підтверджені виробничими випробуваннями, належно апробовані й оприлюднені, впроваджені в навчальний процес підготовки докторів філософії у галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 136 Металургія. Авторка продемонстрував глибоке розуміння сучасних технологій лиття та здатність до їх наукового розвитку.

Представлена дисертаційна робота відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п.п. 6–9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. №44.

Дисертація повністю відповідає вимогам до кваліфікаційних робіт відповідного рівня, а її авторка Наумик Олена Олександрівна заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії у галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 136 Металургія.

### Офіційний опонент:

Завідувач відділу спеціальних сталей та сплавів  
Фізико-технологічного інституту  
металів та сплавів НАН України  
доктор технічних наук,  
старший науковий співробітник,  
член-кореспондент НАН України

Юлія КВАСНИЦЬКА

Підпис офіційного опонента, зав. відділу ФТІМС НАН України,  
чл.-кор. НАН України Юлії Квасницької засвідчую:

Вчений секретар Фізико-технологічного інституту  
металів та сплавів НАН України,  
к.т.н., ст.н.сп.



Володимир ЛАХНЕНКО