

**ВІДГУК**  
офіційного опонента на дисертаційну роботу  
**Квасницької Катерини Геннадіївни**  
на тему «**Вдосконалення технології виготовлення керамічних  
оболонкових форм для одержання виливків деталей газотурбінних  
двигунів**»,  
представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії  
в галузі знань **13 Механічна інженерія**  
за спеціальністю **136 Металургія**

Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел з 108 найменувань. Загальний обсяг дисертації складає 140 сторінок друкованого тексту, включаючи 50 рисунків, 32 таблиці та 3 додатки.

**Актуальність теми дисертації.**

Подальший розвиток газотурбобудування для потреб транспортної та енергетичної галузей вимагає не тільки нових матеріалів і сучасних технологій їх застосування, а також відповідної теоретичної бази, як підґрунтя цього розвитку. Для вирішення локальної, на перший погляд, задачі отримання якісних лопаток для високоресурсних ГТД необхідно залучення фахівців і вчених різних областей знань та технологій, і матеріал, поданий у дисертаційній роботі, є, в цьому сенсі, **актуальним** для вирішення цієї задачі в цілому як в теоретичному, а також практичному ракурсах.

Відомо, що переважаючим способом виготовлення лопаток є лиття за моделями, що витоплюються, і якість литва з жароміцних сплавів на пряму корелює з експлуатаційними характеристиками керамічного оснащення оболонкових форм. Тому розглянуті в роботі в комплексі питання як дослідження матеріалів оболонкових форм, так і одержання складнопрофільних виливків з високими експлуатаційними властивостями досягли поставленої мети – вдосконалення матеріалів і технологій для підвищення якості виливків відповідального призначення, а саме робочих лопаток газотурбінних двигунів.

Зміст роботи дозволяє в цілому оцінювати роботу як комплексну, з науковими та технологічними компонентами та органічністю поданого матеріалу. Науковий компонент включає, окрім різноманітних інструментальних досліджень, також ретельний аналіз компонентів керамічних оболонкових форм та матеріалів модельних мас. Грамотне трактування результатів теоретичних і експериментальних досліджень зразків керамічних оболонкових форм з різним складом наповнювача та в'язучого дозволило зробити припущення щодо механізму зміцнення компонентів форми.

В практичній площині велику користь мають рекомендації по вибору складу сумішей та підбору модифікаторів для отримання високих технологічних та експлуатаційних характеристик ливарної кераміки, зокрема

з метою запобігання небажаної взаємодії матеріалу форми з розплавом виливка.

Закономірно, що наслідком проведених при виконанні дисертаційної роботи комплексних досліджень є позитивні технічні та економічні результати дослідно-промислового випробування, які проведені за участю дисертанта на провідному підприємстві газотурбобудування України ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект», м. Миколаїв.

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

Положення наукової новизни відповідають поставленим завданням наукової роботи.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає у наступному:

1. Вперше розроблено технологію виготовлення керамічних оболонкових форм зі зв'язувальними компонентами на водній основі для лиття складнопрофільних виливків із жароміцних сплавів за полілактидними моделями методом 3D-друку. Розроблена технологія не потребує спеціальних умов сушіння та є екологічно безпечною.

2. Встановлено відмінність у міцності зразків керамічних оболонкових форм: кераміка на водних зв'язувальних компонентах з вогнетривким наповнювачем корундом має удвічі вищу міцність порівняно з аналогами на основі гідролізованого етилсилікату.

3. Вперше встановлено відмінність у газопроникності дослідної кераміки, яка суттєво залежить від форми, розмірів і характеру упаковки сферичних частинок вогнетривких компонентів. Різниця полягає в тому, що газопроникність кераміки, виготовленої з використанням водних зв'язувальних компонентів, на 20% вища порівняно з аналогічною керамікою на основі гідролізованого етилсилікату. Це пояснюється тем, що при перетворенні  $\alpha$ -кварцу в  $\alpha$ -кристоболіт через  $\alpha$ -тридиміт протікає глибока структурна перебудова, яка супроводжується значним збільшенням елементарної комірки. При цьому об'єм матеріалу збільшується на 15 % і відповідно проходить зменшення щільності.

4. Встановлено, що керамічні оболонкові форми на основі корунду з використанням водних зв'язувальних компонентів в інтервалі температур від температури плавлення (1450°C) до 1600 °C не взаємодіють з жароміцними розплавами. Це дозволяє мати високу чистоту поверхні у виливках, що сприяє зменшенню браку лопаток газотурбінних двигунів за пригаром.

5. Уперше розроблено моделі на основі полілактиду 3D-друком, призначені для виготовлення керамічних оболонкових форм з метою отримання виливків деталей газотурбінних двигунів. Експериментально визначено, що такі моделі мають мінімальну усадку~0,4 %, екологічнобезпечні та їх використання сприяє скороченню робочого циклу.

Наукова новизна сформульована зрозуміло, з розкриттям суті. Сформульовані автором положення наукової новизни є обґрунтованими та

відповідають поставленим в ній завданням. Підвищення властивостей керамічних оболонкових форм, одержаних за новою технологією, підтверджені результатами ґрунтовних досліджень, а практичні рекомендації створені на основі промислового випробування розробленої технології. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в фахових наукових виданнях та пройшли апробацію на міжнародних конференціях з металургії.

Поставлене в дисертаційній роботі наукове завдання щодо розробки технології одержання керамічних оболонкових форм, що сприяє підвищенню коефіцієнта використання металу, виконане в повному обсязі. При виконанні експериментальних та теоретичних досліджень здобувач продемонструвала наявність необхідних компетентностей та володіння методологією наукової діяльності повною мірою.

### **Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності.**

Представлена дисертаційна робота Квасницької Катерини Геннадіївни за своїм змістом повністю відповідає стандарту вищої освіти зі спеціальності 136 Металургія галузі знань 13 - Механічна інженерія та предметній області, що визначена освітньо-науковою програмою підготовки докторів філософії зі спеціальності - 136 Металургія.

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею, наведені результати та висновки свідчать про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям «Металургія».

За результатами розгляду звіту подібності та перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадиння можна зробити висновок, що дисертаційна робота Квасницької Катерини Геннадіївни є результатом самостійних наукових досліджень здобувача. Робота не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату, запозичень або несанкціонованого використання здобувачем результатів інших авторів. Використані здобувачем ідеї, результати та тексти інших авторів мають належні посилання на відповідні джерела.

### **Мова та стиль викладення результатів.**

Дисертаційна робота Квасницької Катерини Геннадіївни виконана українською мовою. Подані у дисертації матеріали та результати досліджень, отримані дисертантом, послідовно викладені за окремими розділами. Структура роботи побудована таким чином, що дозволяє чітко простежити послідовність етапів проведених досліджень. Графічні матеріали, що включають авторські фотографії та діаграми, повноцінно ілюструють результати експериментів та їх статистичну обробку. Зміст дисертації подано у логічній послідовності з використанням загальноприйнятої технічної термінології, що забезпечує повне та однозначне розуміння отриманих наукових результатів.

Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, загальних висновків, містить список використаних літературних джерел і 3 додатки. Загальний

обсяг дисертації становить 140 сторінок, зокрема вона має 90 сторінок основного тексту, 50 рисунків, 15 таблиць, 3 додатки, перелік використаних літературних джерел з 108 бібліографічних найменувань.

У **вступі** представлено обґрунтування актуальності обраної теми, визначено мету та завдання дослідження, окреслено об'єкт і предмет дослідження. Подано відомості про методи, які були використані здобувачем під час виконання роботи. Описано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, зазначено особистий внесок здобувача. Також наведено інформацію про апробацію матеріалів дисертації, публікації, структуру та обсяг роботи.

У **першому розділі** визначена актуальність роботи, наведені результати аналізу сучасних технологічних схем одержання складнопрофільних виливків методом лиття за моделями, що витоплюються. Досліджено вогнетривкі матеріали, що застосовуються для виготовлення керамічних оболонкових форм, проаналізовано їх склад, властивості та напрями практичного використання. Також розглянуто різні суспензії, які використовуються для отримання керамічних оболонкових форм, їх переваги і недоліки. Показано, що сучасні водні зв'язувальні компоненти мають тривалість сушіння шарів форми на рівні з гідролізованим етилсилікатом, не потребують спеціальних умов сушіння і забезпечують високу міцність керамічних оболонок у сирому стані та після прожарювання. Аналіз сучасного стану технології одержання керамічних оболонкових форм виявив ряд невирішених проблем та недосконалостей. Зокрема, недостатньо вивчено комплексний вплив компонентів форми зі сполучним на водній основі на фізико-механічні та спеціальні властивості керамічних оболонок, й це питання потребує уточнення. Автор припускає, що саме використання сполучного на водній основі буде сприяти підвищенню властивостей керамічних оболонкових форм, що в свою чергу сприятиме зниженню браку литих виробів. Проведено аналіз модельних матеріалів для точного лиття складнопрофільних виливків відповідального призначення.

На основі детального аналізу існуючих наукових і практичних результатів автором запропоновано дослідити технологічні властивості водних суспензій на основі електрокорунду, кварцу та дистен-силіманіту, а також виготовлених із них керамічних матеріалів; виконати порівняльну оцінку цих суспензій і керамік з відповідними матеріалами; обґрунтувати вибір матеріалу для виготовлення моделей методом 3D-друку, призначених для формування керамічних оболонкових форм; розробити технологічну схему одержання керамічних оболонкових форм із використанням зв'язувальних компонентів на водній основі за моделями з полілактиду та провести експериментальну перевірку працездатності оболонкових форм шляхом заливання їх жароміцним сплавом, проаналізувати якість отриманих виливків.

У **другому розділі** дисертаційної роботи докладно викладено опис стандартних методик, які були використані для проведення експериментальних досліджень. Наведено детальні характеристики обраних вогнетривких матеріалів та компонентів, що застосовувалися для виготовлення керамічних оболонкових форм. Окрему увагу приділено опису технологічного процесу виготовлення оболонкових форм, послідовності виконання технологічних операцій, режимів та умов їх проведення. Крім того, охарактеризовано обладнання та прилади, використані для реалізації експериментальної частини роботи, із зазначенням їх технічних параметрів і функціональних можливостей, що забезпечують необхідну точність і надійність отриманих результатів.

Наведено методику проведення досліджень із визначення властивостей керамічних оболонкових форм та їх складових, зокрема міцності, ступеня просушеності, газопроникності форм, а також в'язкості й седиментаційної стійкості керамічних суспензій. Детально описано технологічний процес виготовлення оболонкових форм із використанням різних типів зв'язувальних компонентів, із зазначенням технологічних режимів та особливостей кожного етапу. Представлено перелік технологічного обладнання, призначеного для виготовлення полімерних моделей, а також для їх видалення з готових керамічних оболонок.

Окремо подано описи конструкцій та технологічні схеми установок, що застосовувалися для дослідження міжфазної взаємодії системи «керамічна форма — жароміцний розплав», з детальним поясненням їх принципу роботи та умов проведення експериментів.

Для перевірки працездатності керамічних форм визначено тип жароміцного сплаву та описано установку, призначену для плавлення складнопрофільних виливків. Наведено перелік та детальний опис експериментальних досліджень, які забезпечують комплексний підхід до розв'язання поставлених завдань і дозволяють отримати достовірні експериментальні дані та обґрунтовані висновки.

У **третьому розділі** дисертаційної роботи представлено результати експериментальних досліджень фізико-механічних та технологічних властивостей керамічних оболонкових форм, виготовлених із використанням вогнетривких наповнювачів — електрокорунду, плавленого кварцу та дистен-силіманіту з водними зв'язувальними компонентами і гідролізованим етилсилікатом. Проведено ґрунтовний порівняльний аналіз механізмів зв'язування частинок вогнетривких матеріалів у структурі оболонкових форм залежно від типу наповнювача та виду зв'язувального компонента.

Особливу увагу приділено обґрунтуванню вибору матеріалу моделі для виготовлення за допомогою технології 3D-друку, з урахуванням термічних і фізико-хімічних властивостей полімерів, що забезпечують якісне формування оболонкових форм і стабільність їх структури на всіх етапах технологічного процесу.

Крім того, виконано дослідження міжфазної взаємодії зразків керамічних оболонкових форм на основі корунду з різними видами

зв'язувальних речовин та жароміцним розплавом, проаналізовано характер і природу утворення зон взаємодії, товщину реакційного шару та дефектність контактної поверхні.

На підставі отриманих експериментальних даних зроблено висновки щодо оптимальних складів керамічних оболонкових форм, доцільності застосування конкретних вогнетривких наповнювачів і зв'язувальних компонентів, а також обґрунтовано напрями подальших досліджень у цьому напрямі.

**Четвертий розділ** присвячено експериментальній перевірці працездатності керамічних оболонкових форм, виготовлених за новою технологією, розробленою для лиття лопаток газотурбінних двигунів. Розроблено технологічний процес формування оболонкових форм на основі корунду з використанням водного зв'язувального компонента та пластикових моделей, виготовлених методом 3D-друку.

З метою оцінки придатності нових оболонкових форм здійснено повний виробничий цикл виготовлення зразків і робочих лопаток другого ступеня турбіни високого тиску газотурбінного двигуна методом спрямованої кристалізації із жароміцного корозійностійкого сплаву СМ88. Дослідна плавка проводилася на вертикальній ливарній установці VIM-25-175С.

Виконано дослідження макроструктури та мікроструктури виготовлених зразків, а також визначено їхні механічні характеристики, показники тривалої та втомної міцності, а також корозійну стійкість отриманих литих заготовок. Перевірену технологію було рекомендовано для впровадження в умовах виробництва.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. №40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

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

Наукові результати дисертаційної роботи висвітлені у 28 публікаціях, з них: 9 статей в наукових журналах, що входять в наукометричну базу даних Scopus і 4 статті в фахових виданнях України, одна з них одноосібна. Результати дисертації пройшли апробацію на 15 міжнародних наукових фахових конференціях з ливарного виробництва, металургії, матеріалознавства.

При підготовці дисертації автор дотримувався принципів академічної доброчесності.

Публікації здобувача мають достовірну наукову базу та є результатом самостійних досліджень. Наукові положення та висновки дисертації, що виносяться на захист, належать здобувачу і повністю висвітлені у його наукових публікаціях.

## Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1. У тексті дисертації простежується деяка непослідовність у вживанні термінології. Зокрема, на сторінці 38 використовується форма «моделей, які витоплюють», тоді як на сторінці 96 — «моделі, що витоплюються». Аналогічно, на сторінці 23 фігурує термін «водний зв'язувальний компонент», а на сторінці 118 — «водне сполучне». Доцільно було б уніфікувати термінологію по всьому тексту з огляду на вимоги до наукового стилю викладу та для забезпечення внутрішньої логічної цілісності роботи.
2. У третьому розділі дисертації авторка наводить результати, які свідчать про покращення фізико-механічних властивостей керамічних оболонкових форм на водних зв'язувальних системах порівняно з етилсилікатом. Водночас, пояснення механізму цього покращення є дещо узагальненим. Було б бажано більш чітко обґрунтувати, за рахунок яких фізико-хімічних процесів відбувається зміцнення структури при використанні водних систем, зокрема Remasol Premium Plus.
3. У дисертації зосереджено увагу на використанні PLA-пластику як матеріалу для виготовлення витоплюваних моделей. Разом із тим, для більшої доказовості доцільно було б провести порівняльні дослідження з іншим широко вживаним матеріалом — ABS. Також у розділі не подано даних щодо пористості оболонкових форм, яка є важливою характеристикою, що впливає на міцність, термостійкість та газопроникність керамічних оболонок.
4. Важливою характеристикою для оболонкових форм є коефіцієнт лінійного термічного розширення, який безпосередньо впливає на точність лиття та цілісність форми під час нагрівання. Було б доцільно зазначити, чи проводилось визначення КЛТР для розроблених матеріалів, або пояснити доцільність його виключення з дослідження.
5. З огляду на те, що авторкою приділено значну увагу практичному використанню оболонкових форм для лиття жароміцного сплаву СМ88, логічним продовженням дослідження могла б бути оцінка кінетики розчинення або взаємодії кераміки з розплавом. Це дозволило б глибше зрозуміти стабільність форми в умовах безпосереднього контакту з агресивним металевим середовищем.
6. Робота має чітко виражену прикладну спрямованість, однак питання економічної доцільності переходу до нових матеріалів і технологій залишилося поза увагою. Доцільним було б включити хоча б орієнтовну оцінку економічного ефекту від впровадження водних зв'язувальних компонентів, з огляду на зниження пожежної небезпеки, витрат на утилізацію та зменшення тривалості виробничого циклу.
7. У тексті дисертації є окремі стилістичні неточності, зокрема вживання тавтологічних зворотів, наявність дуже довгих та складних для сприйняття речень. Це дещо ускладнює читання окремих фрагментів. Крім того, на деяких рисунках (особливо мікрофотографіях) відсутнє зазначення масштабу або збільшення, що є важливим для коректного інтерпретування



зображень. Рекомендується провести мовно-стилістичну вичитку тексту та деталізувати підписи до ілюстративного матеріалу.

8. У роботі в основному розглянуто виготовлення керамічних оболонкових форм для лопаток газотурбінних двигунів. Разом із тим, враховуючи отримані позитивні результати щодо міцності, газопроникності та екологічності запропонованих матеріалів, доцільно було б окреслити можливі напрями використання цієї технології в інших галузях ливарного виробництва.

Разом із тим, висловлені зауваження не мають принципового характеру та жодним чином не знижують наукової новизни й практичної значущості отриманих результатів, а також не впливають на загальну позитивну оцінку представленої дисертаційної роботи.

### **Висновок про дисертаційну роботу.**

Вважаю, що представлена дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Квасницької Катерини Геннадіївни на тему «Вдосконалення технології виготовлення керамічних оболонкових форм для одержання виливків деталей газотурбінних двигунів» виконана на високому рівні, вона не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, а сукупність її теоретичних та практичних результатів розв'язує наукове завдання, як має вагоме значення для галузі знань Механічна інженерія. Дисертаційна робота за своєю актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, які наведені 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.

Здобувач Квасницька Катерина Геннадіївна заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії у галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 136 Металургія.

### **Офіційний опонент:**

проректор з науково-педагогічної роботи  
та міжнародної діяльності  
Національного університету  
«Запорізька політехніка»  
доктор технічних наук, професор



Валерій НАУМИК