

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертацію  
**Вишнепольського Євгена Валерійовича**  
**«Підвищення якості деталей газотурбінних двигунів, отриманих селективним лазерним спіканням, шляхом алмазного вигладжування»**,  
подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук  
за спеціальністю 05.02.08 – технологія машинобудування

### **Актуальність теми дисертації.**

Важливим завданням сучасної авіаційної та ракетно-космічної галузі є підвищення якості деталей газотурбінних двигунів літальних апаратів одноразового та багаторазового використання. Ефективним напрямом у вирішенні цього завдання є використання нових матеріалів та технологій, які б забезпечували високі технологічні і експлуатаційні характеристики деталей, та забезпечували б зниження їх маси і вартості. Серед них широкого розповсюдження набуло використання порошкових матеріалів та адитивних технологій, насамперед селективного лазерного спікання.

Але відомо, що однією з ключових проблем при виготовленні деталей з використанням селективного лазерного спікання є низький рівень їх механічних властивостей та наявність залишкової пористості. Це нівелює основну перевагу цієї технології, пов'язану з високим коефіцієнтом використання матеріалу.

Більшість навантажених деталей газотурбінних двигунів виготовляються із таких матеріалів як жароміцний сплав ЕП609, нікелевий сплав INCONEL718 та сплавів на основі алюмініду титану або їх аналогів. Їх виробництво є дорогим та ресурсовитратним процесом, а виготовлення цих елементів з порошкових матеріалів майже неможливе у зв'язку з високим рівнем механічних навантажень на деталі газотурбінних двигунів.

Завдання щодо розширення сфери застосування адитивних технологій в авіаційній та ракетно-космічній галузях є актуальним не тільки з практичної, але й з наукової точки зору. Це можна виконати використавши локальне поверхнево-пластичного деформування є алмазним вигладжуванням поверхонь конструктивних концентраторів напружень деталей. Доцільність застосування алмазного вигладжування полягає у тому, що особливості процесів пластичної деформації, які відбуваються у поверхневому шарі, дозволяють ефективно застосовувати цей процес для зниження залишкової пористості і підвищення якості поверхонь конструктивних концентраторів напружень у деталях ГТД.

Тому поєднання таких методів як отримання деталей з порошкових матеріалів селективним лазерним спіканням та їх наступна деформаційна обробка алмазним вигладжуванням, з метою усунення пористості є вирішенням вищевказаної технічної проблеми.

Враховуючи вищесказане вважаю, що тема дисертації, яка пов'язана з підвищенням якості деталей газотурбінних двигунів, отриманих селективним лазерним спіканням, шляхом алмазного вигладжування є актуальною.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Робота відповідає основним напрямкам стратегії відродження вітчизняного авіабудування на період до 2030 року, схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 8 липня 2020 року № 851-р. Дисертаційну роботу виконано відповідно до наукового напрямку кафедри «Технології машинобудування» Національного університету «Запорізька політехніка» у рамках НДР №311-1822/05-Д «Підвищення несучої здатності тонкостінних валів двигуна Д436Т1 технологічними методами» між університетом та АТ «МОТОР СІЧ» (УГК). Автор був відповідальним виконавцем цих, та господарчих проектів.

**Наукова новизна роботи полягає у** теоретичному узагальненні і новому вирішенню актуального завдання підвищення якості заготовок з порошкових матеріалів для виробництва деталей газотурбінних двигунів отриманих селективним лазерним спіканням із застосуванням алмазного вигладжування. До основних елементів наукової новизни слід віднести:

- вперше розроблено новий підхід до зміцнення конструктивних концентраторів напружень деталей, отриманих з порошкових матеріалів шляхом селективного лазерного спікання, експериментально доведено його ефективність. Це базується на ефектах алмазного вигладжування, які дозволяють ущільнювати поверхню деталі, зміцнювати її та формувати поверхневий шар з покращеними властивостями, що підвищить якість деталей в цілому;

- вперше за результатами експериментальних досліджень було виявлено закономірність зміни впливу режимних параметрів зміцнення алмазним вигладжуванням на залишкову пористість поверхневого шару деталей, отриманих зі сплаву на основі алюмінідів титану OX45–3ODS та нікелевого сплаву INCONEL 718. Результати досліджень дозволили визначити раціональні режими локальної деформаційної обробки алмазним вигладжуванням, для зменшення залишкової пористості поверхневого шару та напружено-деформованого стану;

- отримали подальший розвиток уявлення про вплив режимних параметрів алмазного вигладжування конструктивних концентраторів напружень деталей із сплаву ЭП609–Ш на опір втомі, що дозволило встановити їх раціональні поєднання з точки зору забезпечення запасу міцності деталей ГТД.

**Практична цінність роботи** полягає у розробленні технічних рішень, які можуть бути використані при виробництві газотурбінних двигунів для літальних апаратів. До практичної цінності роботи слід віднести те, що:

- для забезпечення високої якості поверхневого шару поверхонь деталей, виготовлених зі сплаву ЭП609–Ш; деталей, отриманих за допомогою селективного лазерного спікання із нікелевого сплаву INCONEL 718 та сплаву на основі алюмініду титану OX45–3ODS розроблені технологічні рекомендації щодо застосування алмазного вигладжування. Які полягають у визначенні раціональних режимів обробки, геометричних параметрах інструменту та зазначенні особливостей його використання;

- розроблено оригінальне оснащення, яке дозволяє виконувати алмазне вигладжування поверхонь конструктивних концентраторів напружень - "Поверхня поєднання двох діаметрів" (патент №36340 Україна), та - "Поверхня переходу

отвору у площину" (патент №63243 Україна);

- методика визначення залишкових напружень методом зондувального отвору адаптована до застосування на криволінійних поверхнях тонкостінних деталей газотурбінних двигунів літальних апаратів;

- результати дисертаційної роботи були використані при обробці деталей газотурбінних двигунів літальних апаратів (ДП «Івченко–Прогрес», АТ «МОТОР СІЧ») та показали позитивний ефект;

- результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі кафедри технології машинобудування Національного університету «Запорізька політехніка» при підготовці бакалаврів і магістрів за спеціальністю 131 «Прикладна механіка» освітньої програми «Технології машинобудування».

### **Ступінь обґрунтованості наукових положень дисертації і їх достовірність і новизна.**

Наведені в дисертації результати отримані на базі загальноприйнятих положень теорії поверхнево пластичного деформування. Запропоновані теоретичні моделі є подальшим розвитком відомих моделей які розроблено провідними фахівцями в галузі технології машинобудування та не суперечать їм. Експериментальні результати отримані на стандартному лабораторному і промислово-му обладнанні, а також за допомогою вимірювального інструменту, який пройшов метрологічний контроль. При цьому використовували достатню для проведення статистичної обробки кількість зразків, що забезпечує достовірність отриманих результатів. Методики досліджень, які безпосередньо впливають на отримані в роботі наукові результати, відповідали діючим стандартам. Розроблені моделі мають оцінку адекватності як за прямими так і за непрямими ознаками. Комплексні експериментально-теоретичні дослідження підтверджені успішною реалізацією результатів в промислових умовах. Таким чином, результати дисертаційних досліджень, сформульовані положення та рекомендації є в повній мірі обґрунтованими.

### **Оцінка змісту дисертації.**

Представлений рукопис дисертації складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг роботи становить 180 сторінок, в тому числі 156 сторінок основного тексту, 75 рисунків та 38 таблиць, список використаних джерел з 118 найменувань та 4 додатки.

Структура роботи відповідає вимогам, що пред'являють до дисертації на звання кандидата технічних наук та не викликає заперечень.

**У вступі** наведено загальну характеристику роботи, у якій обґрунтовано актуальність, наукову новизну і практичну значимість одержаних результатів, визначено об'єкт, предмет дослідження, сформульовано мету і задачі досліджень. Наведено особистий внесок здобувача у виконану роботу, основні дані з апробації дослідження, наукові публікації, відомості про структуру дисертації.

**У першому розділі** розглянуто особливості застосування алмазного вигладжування для обробки конструктивних концентраторів напружень деталей газотурбінних двигунів літальних апаратів. Визначені типи конструктивних концентраторів напружень в типових деталях газотурбінних двигунів. Визначено величи-

ну концентрації напружень, яку вони визивають. Виконано аналіз особливостей виготовлення деталей на параметри якості поверхневого шару. Розглянуто можливість застосування інших методів поверхнево пластичного деформування для обробки поверхонь конструктивних концентраторів напружень. Виконано аналіз актуальності застосування технології алмазного вигладжування для покращення якості конструктивних концентраторів напружень деталей газотурбінних двигунів літальних апаратів. Визначені проблеми, які заважають розповсюдженню адитивних технологій та порошкових матеріалів в авіаційній та ракетно-космічній галузі, та можливі шляхи їх вирішення. За результатами аналізу літературних джерел сформульовано мету та задачі дослідження.

Проведений аналіз є переконливим і його слід вважати достатнім для обґрунтування актуальності поставленої в роботі завдання та вибору напряму дослідження. Постановка задач дослідження відображає сучасні тенденції забезпечення високоякісної та високопродуктивної обробки конструктивних концентраторів напружень деталей газотурбінних двигунів отриманих селективним лазерним спіканням.

**У другому розділі** наведені умови та методики проведення експериментальних досліджень. Визначені геометричні параметри зразків з конструктивними концентраторами напружень типу «Поверхня поєднання двох діаметрів» або «Поверхня переходу отвору в площину». Розроблено конструкції оригінальних пристроїв, які дозволяють виконувати зміцнення відповідних концентраторів. Розроблено конструкцію пристрою для зміцнення алмазним вигладжуванням площинних поверхонь на обробляючих центрах з ЧПК. Наведена методика визначення залишкових напружень за методом свердління зондувального отвору, виконана її адаптація для застосування на деталях газотурбінних двигунів літальних апаратів. Визначені фактори які мають вплив на точність вимірювання залишкових напружень на тонкостінних деталях газотурбінних двигунів. Наведено структурну схему дисертаційної роботи, на основі якої проведено обґрунтування напряму дослідження. У розділі наведені дані про матеріали, на які орієнтується обробка алмазним вигладжуванням і для яких були проведені експериментальні дослідження, параметри інструменту.

**У третьому розділі** визначено особливості зміцнення алмазним вигладжуванням конструктивних концентраторів напружень деталей, виготовлених із жароміцного сплаву ЭП609-Ш. Досліджено вплив параметрів алмазного вигладжування на характеристики поверхневого шару деталей, виготовлених із даного сплаву. Визначено раціональні режими алмазного вигладжування конструктивних концентраторів напружень типу «Поверхня поєднання двох діаметрів» або «Поверхня переходу отвору у площину». Так для конструктивного концентратору напружень типу «Поверхня поєднання двох діаметрів» застосування алмазного вигладжування з зусиллям 200 Н, подачею 0,07 мм/об, швидкістю вигладжування 92 м/хв дозволило підвищити опір втомі з 410 МПа до 530 МПа. Застосування алмазного вигладжування для зміцнення конструктивного концентратору напружень типу «Поверхні переходу отвору у площину»

підвищує опір втомі з 400 МПа для вихідного зразка до 520 МПа при вигладжуванні зусиллям 30 Н, подачею 0,05 мм/об, швидкістю вигладжування 4,71 м/хв.

**У четвертому розділі** виконані дослідження особливостей зміцнення алмазним вигладжуванням деталей, виконаних з порошкових матеріалів, сплаву на основі алюмініду титана OX45-3ODS та жароміцного нікелевого сплаву INCONEL 718, синтезованих за допомогою селективного лазерного спікання.

Встановлено, що для вигладжування сплаву на основі алюмініду титана OX45-3ODS необхідно застосовувати алмазні вигладжувачі з радіусом сфери алмазу більше 2,5 мм. Визначено, що алмазне вигладжування ефективно застосовувати для ущільнення поверхневого шару виробів з порошкових матеріалів, на прикладі сплаву на основі алюмініду титана OX45-3ODS. Мінімальні значення залишкової пористості можна досягти при алмазному вигладжуванні з режимними параметрами: зусиллі 0,2 - 0,3 кН, подачі 0,12 - 0,15 мм/об, та радіусі сфери алмазного вигладжувача 2,5 мм.

Проведені дослідження, які довели ефективність застосування алмазного вигладжування для зміцнення нікелевого сплаву INCONEL 718, отриманого селективним лазерним спіканням. Раціональним поєднанням режимних параметрів, при яких і ступінь наклепу буде  $S_{нц}=35\%$ , а шорсткість досягне значення  $Ra=0,74\text{мкм}$  є обробка з зусиллям вигладжування  $F = 0,25$  кН, подачею  $S = 0,1$  мм/об, радіусом сфери алмазного вигладжувача  $R_{sf} = 2,5$  мм. Розроблені математичні моделі, які дозволяють прогнозувати параметри якості поверхневого шару та степені деформаційного зміцнення після алмазного вигладжування в залежності від того чи іншого поєднання режимних параметрів.

**У п'ятому розділі** виконано розрахунок економічної ефективності застосування селективного лазерного спікання та алмазного вигладжування при виробництві деталей ГТД літальних апаратів, на основі розрахунку собівартості та аналізу необхідних капітальних вкладень. Визначено вплив алмазного вигладжування на статичний запас міцності конструктивних концентраторів напружень деталей, виготовлених селективним лазерним спіканням порівняно з виготовленням з традиційних матеріалів.

**У додатках** наведено результати впровадження роботи на ДП «Івченко-Прогрес», у навчальному процесі та науково-дослідних роботах НУ «Запорізька політехніка»; перелік опублікованих праць за темою дисертації.

Текстова частина роботи добре проілюстрована розрахунковими схемами, графіками, фотографіями, довідковий та узагальнюючий матеріал наведений у таблицях. На основі проведеної експертизи слід констатувати наявність усіх необхідних елементів у роботі.

**Висновок про повноту опублікування основних положень дисертації, аналіз автореферату.**

Результати отримані за підсумками проведених наукових досліджень, наведені в дисертаційній роботі, були надруковані у 20 працях, зокрема: 6 статей – у фахових виданнях України, 2 статі – у наукових журналах, внесених до міжнародної наукометричної бази даних SCOPUS та Web of Science, 10 матеріалів конференцій. На нові технічні рішення отримано 2 патенти України. У працях,

які надруковані у співавторстві, визначено особистий внесок автора. У роботах повністю відображена суть виконаних досліджень.

#### **Зауваження по дисертації та автореферату.**

1. Оскільки робота спрямована на підвищення якості робочих поверхонь деталей газотурбінних двигунів, то в першому розділі дисертаційної роботи доцільно було б більше уваги приділити аналізу альтернативних методів поверхнево-пластичного деформування, спрямованих на її підвищення.

2. У роботі варто було б привести результати впливу режимів обробки на стійкість інструменту, рекомендації з вибору матеріалу інструмента і його характеристик.

3. При отриманні регресійних моделей (розділ 4) автор не використав нормалізацію даних, метою якої є приведення значень коефіцієнтів регресійних рівнянь до деяких безрозмірних одиниць та одного масштабу, це знизило інформаційну цінність регресійних моделей.

4. У пункті 3 висновків до дисертаційної роботи вказано, що розроблені конструкції оригінальної оснастки, однак у додатках до дисертаційної роботи конструкторської документації не виявлено. Який саме тип технічної документації розроблений для вказаних конструкцій оригінальної оснастки.

5. У роботі зустрічаються описки, неточності формулювання, варто було притримуватись однакової термінології.

#### **Загальні висновки.**

Не зважаючи на виявлені недоліки дисертаційна робота Вишнепольського Євгена Валерійовича на тему «Підвищення якості деталей газотурбінних двигунів, отриманих селективним лазерним спіканням, шляхом алмазного вигладжування» є завершеною науковою працею, яка представлена на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.08 – технологія машинобудування, є завершеною науковою працею, яка за своїм змістом, структурою, обсягом, науковою новизною та практичним значенням відповідає паспорту спеціальності 05.02.08 – технологія машинобудування та пп. 9, 11, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», що пред'являються до дисертацій на звання кандидата технічних наук, а її автор заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.08 – технологія машинобудування.

Офіційний опонент,  
професор кафедри автомобілів  
Тернопільського національного технічного університету  
ім. І. Пулюя, м. Тернопіль,  
д.т.н., проф.

В.О. Дзюра

підпис Дзюри В.О. засвідчую  
проректор з наукової роботи



П.О. Марущак