

Міністерство освіти і науки України  
Національний університет «Львівська політехніка»

**ВИШНЕПОЛЬСЬКИЙ ЄВГЕН ВАЛЕРІЙОВИЧ**



УДК 67.02:621.787.4:621.762.8

**ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ,  
ОТРИМАНИХ СЕЛЕКТИВНИМ ЛАЗЕРНИМ СПІКАННЯМ,  
ШЛЯХОМ АЛМАЗНОГО ВИГЛАДЖУВАННЯ**

05.02.08 Технологія машинобудування

131 Прикладна механіка

13 Механічна інженерія

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Львів – 2023

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі технології машинобудування Національного університету «Запорізька політехніка» Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник** доктор технічних наук, професор  
**Павленко Дмитро Вікторович**,  
Національний університет «Запорізька політехніка»,  
професор кафедри технології авіаційних двигунів.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Ступницький Вадим Володимирович**,  
Національний університет «Львівська політехніка»,  
завідувач кафедри робототехніки  
та інтегрованих технологій машинобудування.

доктор технічних наук, професор  
**Дзюра Володимир Олексійович**,  
Тернопільський національний технічний університет  
ім. І. Пулюя, професор кафедри  
автомобілів.

Захист відбудеться 22 березня 2023 р. о 15<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.06 у Національному університеті «Львівська політехніка» за адресою: 79013, Львів, вул. Професорська, 1, ауд. 61, навчальний корпус 14.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці за адресою: 79013, Львів, вул. Професорська, 1 та на сайті Національного університету «Львівська політехніка» в розділі «Наука».

Автореферат розісланий 14 лютого 2023 року.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 35.052.06,  
кандидат технічних наук, доцент

Юрій ШОЛОВІЙ

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Важливим питанням підвищення якості літальних апаратів одноразового та багаторазового використання є розробка, вдосконалення та впровадження принципово нових технологій, які б забезпечували їх високі технологічні і експлуатаційні властивості, призводили б до зниження їх маси і вартості, підвищували б їх надійність. У літальних апаратах широкого розповсюдження набуло використання газотурбінних двигунів (ГТД). Зазвичай вони працюють в умовах високих навантажень та агресивного середовища, що спричиняє появу тріщин, які призводять до руйнування деталей двигунів. Серед найчастіших причин руйнування – корозія та втома. Для підвищення якості ГТД все більшого розповсюдження набуває використання жароміцних нікелевих і титанових сплавів. Вони характеризуються високим рівнем таких властивостей, як міцність, опір окисленню та корозії. Але одночасно з цим зазначені сплави погано піддаються обробці різанням, що призводить до збільшення часу та вартості їх обробки. Також слід зазначити, що більша частина деталей двигуна має складний профіль, тому отримання заготовок для них традиційними методами призводить до необхідності знімання великої кількості стружки, а, отже, до низьких значень коефіцієнта використання матеріалу. Забезпечити виконання таких суперечливих вимог можливо, якщо застосувати до їх виробництва адитивні технології та методи порошкової металургії. Їх перевагами є: можливість створення принципово нових матеріалів із заданими властивостями, які неможливо отримати іншими способами, та отримання заготовок за формою, близькою до готової деталі, що істотно знижує витрати на подальшу обробку та впровадження у виробництво нових ГТД літальних апаратів.

Однак, окрім великої кількості переваг, є фактори, які стримують розповсюдження адитивних технологій для виробництва деталей авіаційної та ракетно-космічної техніки, оскільки призводять до зниження їх запасу міцності та рівня надійності. До таких недоліків відносяться: залишкова пористість, низька точність та рівномірність отримуваних виробів, чутливість до концентрації напружень.

Вирішити вказані протиріччя можна за допомогою локального поверхнево-пластичного деформування (ППД) алмазним вигладжуванням (АВ) поверхонь їх конструктивних концентраторів напружень. Особливості процесів пластичної деформації, що відбуваються у поверхневому шарі при АВ, дозволяють ефективно застосовувати його для зниження залишкової пористості і підвищення механічних характеристик місць концентрації напружень у деталях ГТД. Наприклад, у деталях, виготовлених методом селективного лазерного спікання з алюмініда титану OX45–3ODS та нікелевого сплаву INCONEL 718.

Отже, на сьогодні питання розширення сфери застосування адитивних технологій та підвищення якості поверхневого шару деталей, виготовлених з нікелевих сплавів та сплавів на основі алюмініда титану, отриманих за допомогою селективного лазерного спікання, є актуальним науково-прикладним завданням.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** 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), а також стратегії відродження вітчизняного авіабудування на період до 2030 року, схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 8 липня 2020 року № 851-р.

**Мета і задачі дослідження.** *Мета дослідження* – підвищення якості поверхневого шару конструктивних концентраторів напружень деталей ГТД літальних апаратів.

Для досягнення зазначеної мети поставлені наступні завдання дослідження:

- виконати класифікацію конструктивних концентраторів напружень деталей ГТД літальних апаратів та визначити раціональну технологію підвищення їх якості;
- виконати аналіз факторів, які заважають розповсюдженню адитивних технологій у виробництві, та особливостей застосування алмазного вигладжування для підвищення якості деталей ГТД літальних апаратів;
- розробити спеціальні методики і пристрої для проведення алмазного вигладжування поверхонь та визначити раціональну геометрію алмазного вигладжувача для зміцнення конструктивних концентраторів напружень деталей ГТД літальних апаратів;
- адаптувати методику визначення залишкових напружень методом зондувального отвору для застосування на поверхнях деталей ГТД літальних апаратів;
- експериментально дослідити процес алмазного вигладжування з метою визначення впливу його технологічних умов та режимних параметрів зміцнення на параметри якості деталей ГТД літальних апаратів;
- встановити основні закономірності формування параметрів якості, властивостей обробленої поверхні і поверхневого шару (шорсткість, величина деформаційного зміцнення і залишкових напружень) залежно від режимних параметрів процесу (зусилля вигладжування, подача), геометрії алмазного вигладжувача (радіус вигладжувача), особливостей поверхневого шару (залишкова пористість) для деталей, отриманих за допомогою СЛС з різних матеріалів;
- дослідити технологічні особливості обробки і впливу режимних параметрів алмазного вигладжування на параметри пористості при зміцненні деталей ГТД літальних апаратів, отриманих СЛС;
- розробити технологічні рекомендації щодо застосування алмазного вигладжування для зміцнення конструктивних концентраторів напружень при виробництві деталей ГТД літальних апаратів.

*Об'єкт дослідження* – процес алмазного вигладжування поверхневого шару деталей ГТД літальних апаратів.

*Предмет дослідження* – закономірності зміни якісних параметрів поверхневого шару конструктивних концентраторів напружень деталей ГТД зі сплавів типу ЭП609-Ш, ОХ45–3ОДС та INCONEL 718 після алмазного вигладжування.

**Методи дослідження.** При виконанні дисертаційної роботи використані наступні методи аналізу: методи інженерної механіки – для дослідження властивостей поверхневого шару та визначення залишкових напружень після обробки; металографічні методи – для дослідження параметрів пористості поверхневого шару; методи ма-

тематичної статистики – для обробки результатів випробувань у програмному забезпеченні StatSoft (Statistica); чисельні методи – для розрахунку на статичну міцність деталей та визначення ефективності застосування зміцнення поверхні конструктивних концентраторів напружень.

#### **Наукова новизна отриманих результатів.**

1. Вперше запропоновано та експериментально доведено ефективність нового підходу до зміцнення конструктивних концентраторів напружень деталей, отриманих з порошкових матеріалів шляхом селективного лазерного спікання, що дозволило підвищити їх якість. Новий підхід базується на ефектах алмазного вигладжування: ущільненні поверхневого шару, його зміцненні та формуванні стискаючих залишкових напружень.

2. Вперше встановлено та експериментально підтверджено закономірності зміни впливу режимних параметрів зміцнення на залишкову пористість, експериментально підтверджено закономірності зміни параметрів порового простору поверхневого шару деталей, отриманих методом селективного лазерного спікання, зі сплавів ОХ45–3ОДС та INCONEL 718 у взаємозв'язку з режимними параметрами локальної деформаційної обробки алмазним вигладжуванням, що дозволило визначити раціональні режими обробки з точки зору зменшення залишкової пористості поверхневого шару та напружено-деформованого стану.

3. Отримали подальший розвиток уявлення про вплив режимних параметрів алмазного вигладжування конструктивних концентраторів напружень деталей із сплаву ЕП609–Ш на опір втомі, що дозволило встановити їх раціональні поєднання з точки зору забезпечення запасу міцності деталей ГТД.

#### **Практичне значення отриманих результатів.**

1. Розроблено технологічні рекомендації щодо використання алмазного вигладжування (раціональні режими обробки, геометричні параметри інструментів та особливості їх використання) для забезпечення високої якості поверхневого шару поверхонь деталей, виготовлених зі сплаву ЕП609–Ш; матеріалів, отриманих за допомогою СЛС із нікелевого сплаву INCONEL 718 та сплаву на основі алюмініда титану ОХ45–3ОДС.

2. Розроблено оригінальний пристрій, що дозволяє виконувати алмазне вигладжування поверхонь конструктивного концентратора напружень типу «поверхня поєднання двох діаметрів», який забезпечує постійну силу вигладжування під час обробки в усіх точках поверхні (патент №36340 Україна).

3. Розроблено оригінальний пристрій, що дозволяє виконувати алмазне вигладжування поверхні переходу отвору у площину (патент №63243 Україна).

4. Розроблено оригінальний пристрій, що дозволяє виконувати алмазне вигладжування площинних поверхонь на верстатах з числовим програмним керуванням.

5. Удосконалено методика визначення залишкових напружень на поверхнях деталей ГТД літальних апаратів методом зондувального отвору.

6. Результати дисертаційної роботи були використані при обробці деталей ГТД літальних апаратів (ДП «Івченко–Прогрес», АТ «МОТОР СІЧ»).

7. 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».

**Особистий внесок здобувача.** Основні наукові положення і результати, які виносяться на захист дисертаційної роботи, отримано здобувачем самостійно. Серед них: розробка різноманітних методик; проведення експериментальних досліджень; обробка отриманих результатів і їх аналіз; розробка технологічних рекомендацій. Спільно зі співробітниками лабораторії «Новітні технології в авіадвигунобудуванні» Національного університету «Запорізька політехніка» проведено дослідження залишкових напружень поверхневого шару методом зондувального отвору та визначення величини деформаційного зміцнення. При цьому автором виконано розрахунки і обробку результатів експериментів.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати роботи доповідались і обговорювались на науково-практичних та науково-технічних конференціях: «Молодь в авіації: нові рішення і передові технології» (Алушта, 2007, 2008 рр.); «XII Міжнародний конгрес двигунобудівників» (Рибаче, 2007 р.); «Проблеми енергозбереження і механізації в гірничо-металургійному комплексі» (Кривий Ріг, 2011 р.); «Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво» (Запоріжжя, 2009 р.; Суми, 2010, 2014 рр.; Київ, 2012 р.; Кременчук, 2013 р.); XXII міжнародний науково-технічний семінар «Високі технології: Тенденції розвитку» (Одеса, 2014 р.); III Всеукраїнська науково-технічна конференція «Прогресивні технології в машинобудуванні» (Львів, 2015 р.); XI Міжнародні науково-технічні читання ім. А.Ф. Можайського (Запоріжжя, 2018 р.); «XXV Міжнародний конгрес двигунобудівників» (Харків, 2020 р.); IEEE 10th International Conference «Nanomaterials: Applications & Properties» (NAP) (Суми, 2020 р.).

**Публікації.** Основний зміст дисертації відображено у 20 наукових публікаціях, серед яких: 6 статей у наукових фахових виданнях України, 2 – у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз SCOPUS та Web of Science, 2 патенти України на корисні моделі, 10 матеріалів конференцій.

**Структура й обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається з анотації двома мовами, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел з 118 найменувань та 4 додатків. Дисертацію викладено на 180 сторінках комп'ютерного тексту (основна частина – 156 сторінок), містить 38 таблиць та 75 рисунків.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність дисертації, сформульовано її мету і задачі, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, особистий внесок здобувача, наведено основні дані щодо апробації роботи і публікацій, відомості про структуру та загальну характеристику дисертаційної роботи.

У **першому розділі** розглянуті фактори, які призводять до руйнування деталей ГТД літальних апаратів одноразового та багаторазового використання. Виконано аналіз параметрів поверхневого шару, які мають вплив на експлуатаційні характеристики

деталі. Встановлено, що для підвищення якісних параметрів деталей в авіаційній та ракетній галузях широкого розповсюдження набуває використання адитивних технологій та матеріалів з покращеними фізичними та механічними властивостями. Виконано аналіз переваг та проблем, які заважають розповсюдженню адитивних технологій та порошкових матеріалів в авіації та машинобудуванні. Серед них можна зазначити залишкову пористість, вартість порошку, рівномірність, чутливість до концентрації напружень, якість поверхневого шару. Виконано аналіз можливості застосування методів поверхнево-пластичного деформування для розширення сфери застосування адитивних технологій для виробництва деталей ГТД літальних апаратів. Встановлено, що з типових конструктивних концентраторів найбільші напруження викликають поверхні поєднання двох діаметрів та поверхні переходу отвору у площину. За базовим технологічним процесом вимоги щодо формування поверхні переходу отвору у площину встановлені на рівні 1,1...1,5мм та забезпечуються фаскою або радіусом. Від різної форми поверхні переходу виникають різні рівні напружень – від 784 МПа для фаски 1,1мм до 668 МПа для фаски 1,5мм. Для зниження впливу конструктивних концентраторів напружень на опір втомі деталей та підвищення якості їх поверхневого шару доцільно використовувати один з методів поверхнево-пластичного деформування. Визначено актуальність застосування алмазного вигладжування для покращення якості конструктивних концентраторів напружень деталей ГТД літальних апаратів. За результатами аналізу літературних джерел сформульовано мету та задачі дослідження.

**У другому розділі** визначені основні методики дослідження параметрів якості поверхні та властивостей поверхневого шару дослідних зразків після зміцнення алмазним вигладжуванням.

Розроблено спеціальні зразки з конструктивними концентраторами напружень типу «поверхня переходу отвору у площину», для яких максимум напружень знаходиться у зоні конструктивного концентратора і більш ніж на 35% перевищує значення напружень в інших зонах. Визначено основні умови та режими їх дослідження. Розроблено конструкції оригінальних оправок для локального зміцнення алмазним вигладжуванням конструктивних концентраторів напружень та площинних поверхонь на обробляючих центрах, а також оригінальний пристрій для формування поверхні конструктивного концентратора напружень типу «поверхня переходу отвору у площину».

Встановлено, що для обробки конструктивних концентраторів напружень деталей ГТД літальних апаратів не доцільно використовувати стандартні вигладжувачі.

У результаті кут конусу державки вигладжувача було змінено зі  $120^{\circ}$  до  $75^{\circ}$  (рис. 1).

Удосконалено методику визначення залишкових напружень за допомогою зондувального отвору на складнопрофільних тонкостінних поверхнях деталей ГТД за допомогою комплексу Restan MTS 2000.

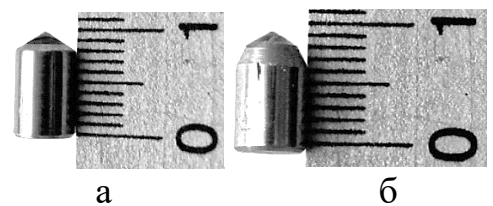


Рис. 1. Алмазний вигладжувач: а – стандартний; б – модифікований.

Комплекс Restan MTS 2000 дозволяє отримати інформацію – величини максимального і мінімального напруження та головний кут його зміни за глибиною – про зміну деформації за трьома напрямками. Встановлено, що значний вплив на точність вимірювання в місці установки тензометричної розетки має температура оточуючого середовища в процесі досліджень та нагрівання датчика, спричинене електричним струмом, що проходить крізь нього.

Таким чином, розроблено комплекс методичного забезпечення, який дозволив реалізувати дослідження, необхідні для підвищення якості деталей ГТД, отриманих селективним лазерним спіканням, шляхом алмазного вигладжування.

**Третій розділ** присвячено визначенню особливостей зміцнення алмазним вигладжуванням конструктивних концентраторів напружень деталей, виготовлених із жароміцного сплаву ЭП609–Ш. Досліджено залежність характеристик поверхневого шару зразків від режимних параметрів алмазного вигладжування. Визначено їх вплив на опір втомі.

Встановлено, що найбільший вплив на шорсткість поверхневого шару має зусилля вигладжування та подача (рис. 2).

Досліджено вплив різного поєднання режимних параметрів алмазного вигладжування на ступінь деформаційного зміцнення поверхневого шару. Досліджувані режимні параметри по-різному впливають на значення ступеня деформаційного зміцнення (рис. 3.). Так, зі збільшенням зусилля вигладжування величина деформаційного зміцнення збільшується, це слушно у досліджуваному діапазоні. Однак, підвищення зусилля може призвести до розміцнення поверхневого шару.

Встановлено, що зі збільшенням подачі вигладжування величина ступеня деформаційного зміцнення зменшується, це пояснюється недостатнім перекриттям канавок від алмазного вигладжування та, як результат, зменшенням силового впливу від вигладжувача на поверхню, що обробляється. Збільшення швидкості вигладжування призводить до зменшення ступеня деформаційного зміцнення, що відбувається внаслідок пришвидшення переміщення вигладжувача та зменшення часу його контакту з поверхнею, яка обробляється, за одиницю часу.

Варіювання параметрів алмазного вигладжування в досліджуваних межах призвели до формування деформаційного зміцнення поверхневого шару у досить широкому діапазоні. Розбіжність за величиною ступеня деформаційного зміцнення склала від 10 до 37%.

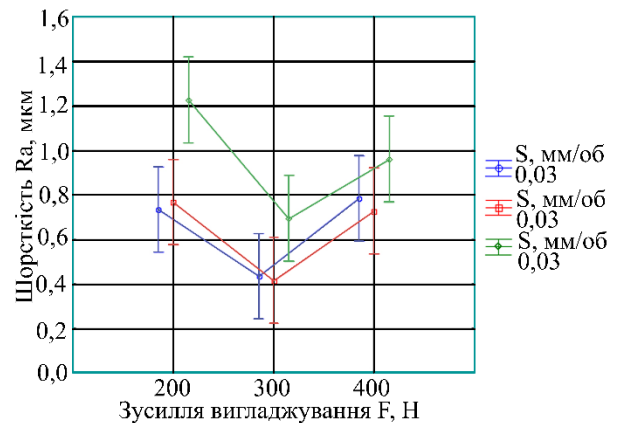


Рис. 2. Вплив режимних параметрів алмазного вигладжування на шорсткість поверхні зразків



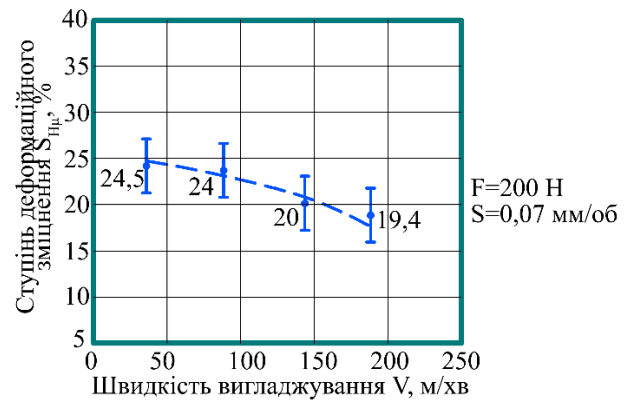
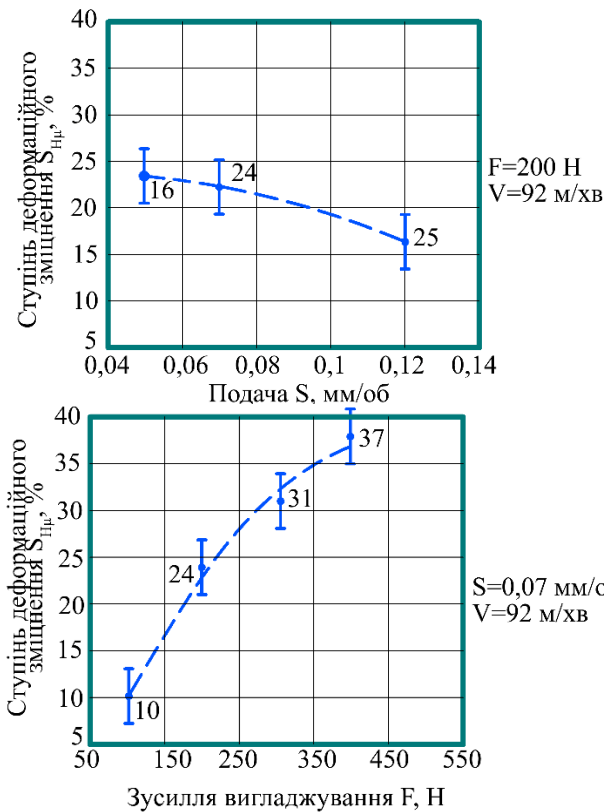


Рис. 3. Вплив режимних параметрів алмазного вигладжування на ступінь деформаційного зміцнення поверхневого шару зразків

Визначено вплив поєднання режимних параметрів алмазного вигладжування на формування залишкових напружень у поверхневому шарі (рис. 4, 5).

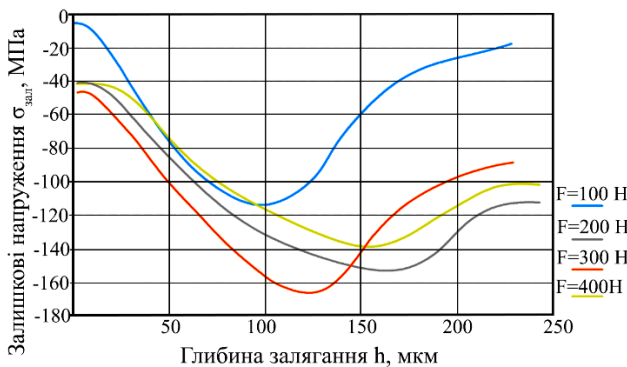


Рис. 4. Вплив зусилля вигладжування на розподіл залишкових напружень

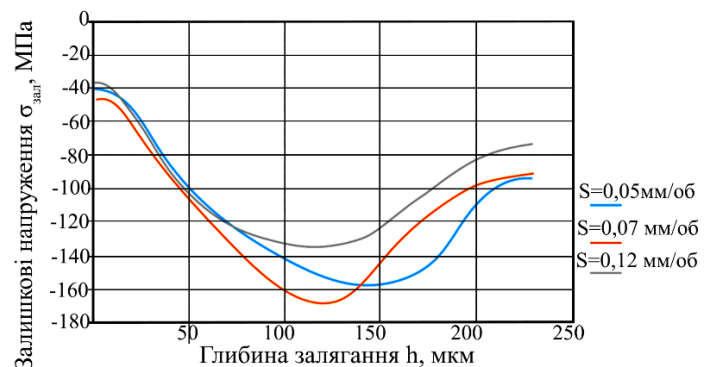


Рис. 5. Вплив подачі вигладжування на розподіл залишкових напружень

Встановлено, що найбільший вплив на розподіл залишкових напружень має зусилля вигладжування. Так, із його зміною (рис. 4.) зі 100 Н до 300 Н величина залишкових напружень на поверхні та за глибиною збільшується. Подальше підвищення зусилля вигладжування не призводить до зміни залишкових напружень на поверхні, але викликає зменшення їх за глибиною залягання із 162 МПа до 138 МПа. Зміна подачі вигладжування в межах варіювання від 0,05 мм/об до 0,12 мм/об (рис. 5.) не викликала значної зміни в формуванні величини залишкових напружень на поверхні. Найбільшого значення вони досягали при подачі вигладжування 0,07 мм/об, їх величина складала 168 МПа. Вигладжування з подачею 0,05 мм/об призводило до розміцнення поверхневого шару та зменшення величини залишкових напружень.

У межах всіх інтервалів варіювання режимних параметрів алмазного вигладжування отримані стискаючі залишкові напруження. Основний вплив на розподіл залишкових напружень має зусилля вигладжування. Найбільші за значенням стискаючі напруження 170 МПа було отримано при вигладжуванні з зусиллям 300 Н, подачею 0,07 мм/об, швидкістю 92 м/хв.

Виконано дослідження закономірностей зміни опору втомі від раціонального режиму алмазного вигладжування конструктивних концентраторів напружень типу «поверхня поєднання двох діаметрів» (рис. 6а) та «поверхня переходу отвору у площину» (рис. 6б).

Встановлено, що алмазне вигладжування конструктивного концентратора напружень типу «поверхня поєднання двох діаметрів» (рис. 6а) з раціональним поєднанням режимних параметрів (зусилля – 200 Н, подача – 0,07 мм/об, швидкість – 92 м/хв) дозволило підвищити границю втоми на 29 %.

Визначено, що застосування алмазного вигладжування значно підвищує границю втоми зразка з конструктивним концентратором напружень типу «поверхня переходу отвору у площину» (рис. 6б).

Для зразків без зміцнення вона склала 400 МПа. Застосування алмазного вигладжування дозволило підвищити її до 520 МПа.

Для підвищення якості поверхневого шару конструктивного концентратора напружень типу «поверхня переходу отвору у площину» раціонально використовувати вигладжування з наступними режимними параметрами: зусилля 30 Н, подача 0,05 мм/об, швидкість 4,71 м/хв.

У четвертому розділі для розширення сфери застосування деталей, отриманих за допомогою селективного лазерного спікання, запропоновано використовувати алмазне вигладжування для зміцнення поверхневого шару місць концентрації напружень. Для підвищення якості деталей, виготовлених зі сплаву на основі алюмініда титану OX45–3ODS (Ti - 45Al-3Nb - Y2O3), виконано дослідження особливостей локальної поверхнево-пластичної деформації алмазним вигладжуванням зразків із зазначеного сплаву, синтезованих лазерним спіканням.

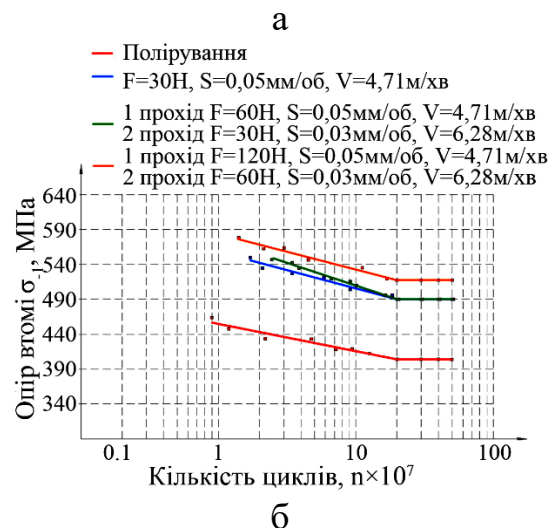
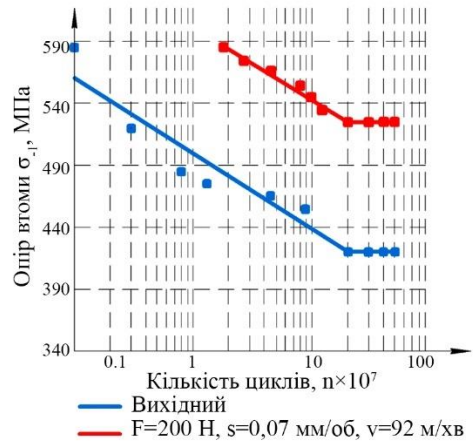


Рис. 6. Криві втоми зразків з різними типами концентраторів напружень: а – «поверхня поєднання двох діаметрів»; б – «поверхня переходу отвору у площину»

Встановлено, що алмазне вигладжування зразків зі сплаву на основі алюмінідів титану ОХ45–3ОДС призводить до зниження пористості поверхневого шару та закриття тупикових пор (рис. 7).

Досліджено вплив режимних параметрів алмазного вигладжування на формування якості поверхневого шару зразків, отриманих селективним лазерним спіканням, зі сплаву на основі алюмінідів титану ОХ45–3ОДС.

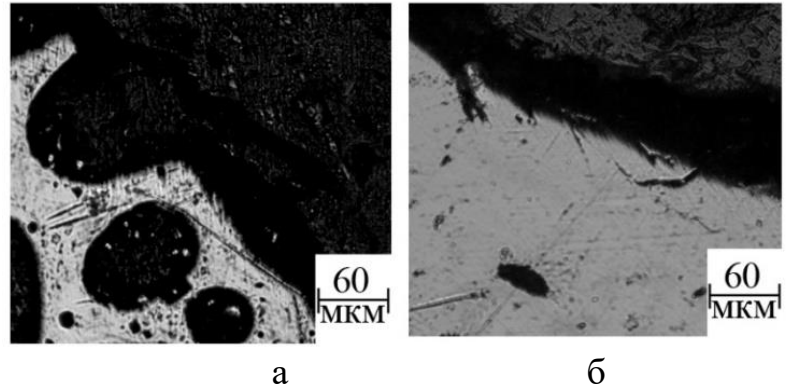


Рис. 7. Поверхня зразків з ОХ45–3ОДС: а – вихідний зразок; б – зразок після алмазного вигладжування ( $F=300$  Н,  $S=0,1$  мм/об,  $Rsf=4$  мм)

Мінімальна шорсткість поверхні забезпечується обробкою із зусиллям 300 Н, подачею 0,1 мм/об та вигладжувачем 2,5 мм (рис. 8б).

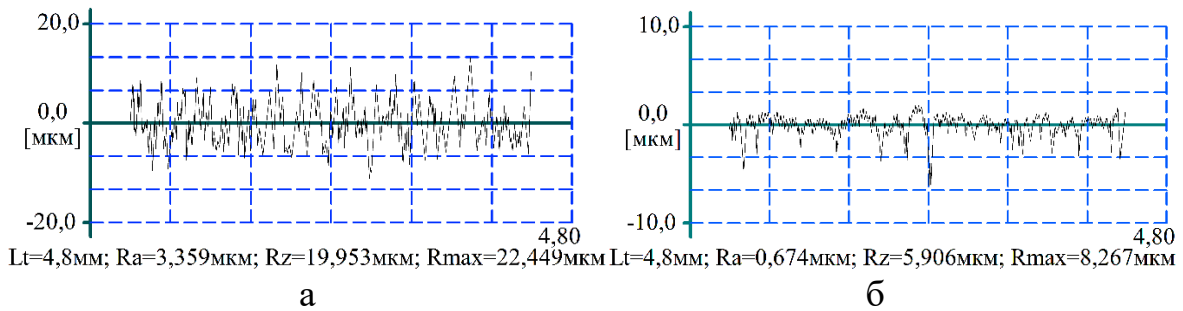


Рис. 8. Профілограми поверхні зразків зі сплаву ОХ45-3ОДС: а – вихідний; б – зміцнений алмазним вигладжуванням ( $F=300$  Н,  $S=0,1$  мм/об,  $Rsf=4$  мм)

Для максимальної ефективності зміцнення сплаву на основі алюмінідів титану ОХ45–3ОДС необхідно враховувати сукупний вплив всіх режимних параметрів вигладжування. Для пошуку раціонального поєднання режимних параметрів, яке дозволило б підвищити якість поверхневого шару, слід зважати на початкову пористість, яка має випадковий розподіл за площею поверхні досліджуваних зразків при їх виготовленні. Значущість факторів визначалася за допомогою статистики Вальда; чинник вважався значущим, якщо  $p$ -рівень відповідної гіпотези становив менше 5%. На основі даних обробки багатфакторного експерименту була отримана регресійна модель, що описує сукупний вплив вихідної пористості, зусилля вигладжування, подачі, радіуса сфери алмаза на параметр шорсткості  $Ra$ :

$$\begin{aligned}
 Ra = & 27,6 - 39,5 \cdot F - 128,6 \cdot S - 9,6 \cdot Rsf - 144,5 \cdot Pr - 15,2 \cdot F^2 + \\
 & 222,7 \cdot S^2 + 0,4 \cdot Rsf^2 + 158,1 \cdot Pr^2 + 165,3 \cdot F \cdot S + 21,2 \cdot F \cdot Rsf + \\
 & 250,6 \cdot F \cdot Pr + 24,6 \cdot S \cdot Rsf + 235,7 \cdot S \cdot Pr + 34,3 \cdot Pr \cdot Rsf - 78,1 \cdot F \cdot S \cdot \\
 & Rsf - 104,8 \cdot F \cdot Pr \cdot Rsf.
 \end{aligned} \quad (1)$$

У результаті перевірки адекватності моделі, шляхом проведення 15 контрольних дослідів, середня помилка моделі склала близько 12%. Це пояснюється впливом вихідної пористості, розподіл якої має випадковий характер.

Отримано закономірності (рис. 9), які показують, що для вигладжування пористих матеріалів необхідно застосовувати алмазні вигладжувачі з радіусом сфери 2,5 мм. Інструмент з меншим радіусом, потрапляючи на тупикові пори, збільшує шорсткість поверхні внаслідок її руйнування.

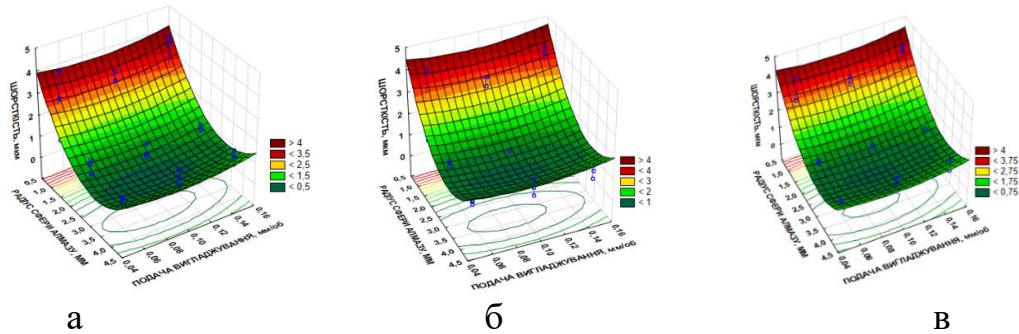


Рис. 9. Залежності шорсткості поверхні зразків від параметрів алмазного вигладжування: а –  $F=0,1$  кН; б –  $F=0,3$  кН; в –  $F=0,4$  кН

Застосування для обробки деталей вигладжувачів з радіусом сфери більш ніж 4 мм не доцільне, оскільки значно збільшує площу контакту інструмента з поверхнею. Для забезпечення питомого тиску необхідно прикладати більші зусилля, що призведе до розтріскування матеріалу. Досліджуваний матеріал має високі характеристики міцності, вигладжування його з силою менше 300 Н не доцільне, оскільки не призводить до достатнього ступеня деформування в зоні контакту. Оптимальна величина подачі для вигладжування сплаву на основі алюмініда титану OX45–3ODS, отриманого шляхом селективного лазерного спікання, становить 0,1 мм/об. Збільшення подачі призводить до недостатнього ступеня перекриття канавок після вигладжування; зменшення подачі – через недостатню пластичність матеріалу – до руйнування уже зміцненої поверхні внаслідок проходу інструмента поряд з вигладженою поверхнею.

Виконано дослідження впливу алмазного вигладжування на формування ступеня деформаційного зміцнення поверхневого шару деталей зі сплаву на основі алюмінідів титану OX45–3ODS, отриманого селективним лазерним спіканням (рис. 10).

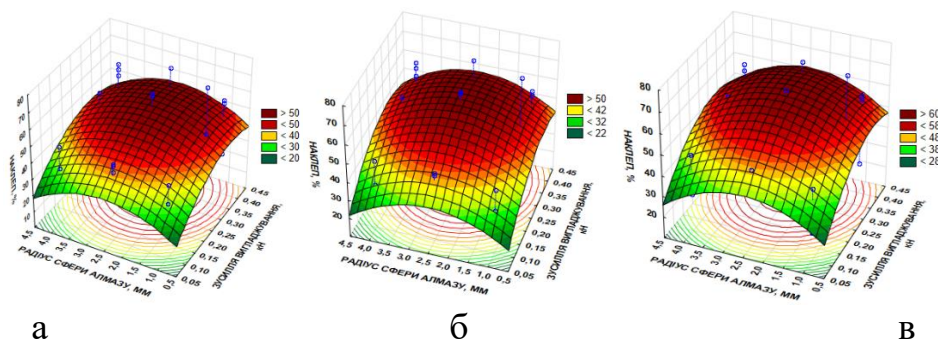


Рис. 10. Залежності ступеня деформаційного зміцнення від режимних параметрів алмазного вигладжування: а –  $S=0,05$  мм/об; б –  $S=0,1$  мм/об; в –  $S=0,15$  мм/об

Дисперсійний аналіз результатів повнофакторного експерименту показав, що найбільший вплив на ступінь деформаційного зміцнення має зусилля вигладжування та його комбінування, певною мірою, з подачею вигладжування. У результаті регресійного аналізу отримано рівняння, що дозволяє прогнозувати величину ступеня деформаційного зміцнення від того чи іншого поєднання режимних параметрів:

$$S_{H\mu} = 0,62 + 5,91 \cdot F - 17,22 \cdot F^2 - 26,54 \cdot S + 154,16 \cdot S^2 + 121,95 \cdot F^2 \cdot S - 567,65 \cdot F^2 \cdot S^2 - 1,63 \cdot F \cdot Rsf + 3,64 \cdot F^2 \cdot Rsf + 13,13 \cdot S \cdot Rsf - 2,02 \cdot S \cdot Rsf^2 - 87,93 \cdot S^2 \cdot Rsf + 14,53 \cdot S^2 \cdot Rsf^2. \quad (2)$$

Шляхом статистичної обробки визначено раціональне поєднання режимних параметрів вигладжування, при якому ступінь деформаційного зміцнення є максимальним (зусилля – 360 Н, подача – 0,13 мм/об, радіус сфери – 2,6 мм).

Середня пористість поверхневого шару зразків зі сплаву на основі алюмінідів титану OX45–3ODS, отриманого селективним лазерним спіканням, складає 15%. Її наявність і хаотичний розподіл пор значно ускладнює процес зміцнення деталі. Внаслідок нерівномірного розподілу тупикових пор у зоні контакту інструмента з поверхнею обробки виникають різні умови деформації. Пори мають круглу форму, утворюють на поверхні "рвані" краї, які можуть бути місцями початку руйнування.

Аналіз мікрофотографій поверхневого шару зразків, зміцнених за різними режимами, підтверджують припущення про те, що невдале поєднання параметрів вигладжування призводить до розтріскування зміцнюваної поверхні (рис. 11б і рис. 11в). Їх оптимальне поєднання (рис. 11г) знижує залишкову пористість поверхневого шару зразка.

Отримано регресійне рівняння, яке дозволяє прогнозувати величину залишкової пористості від різного поєднання режимних параметрів алмазного вигладжування:

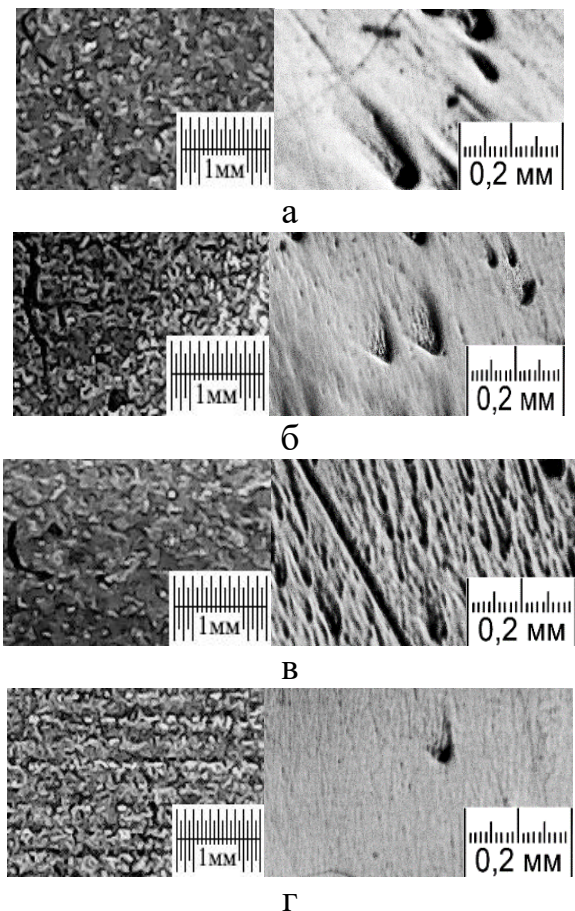


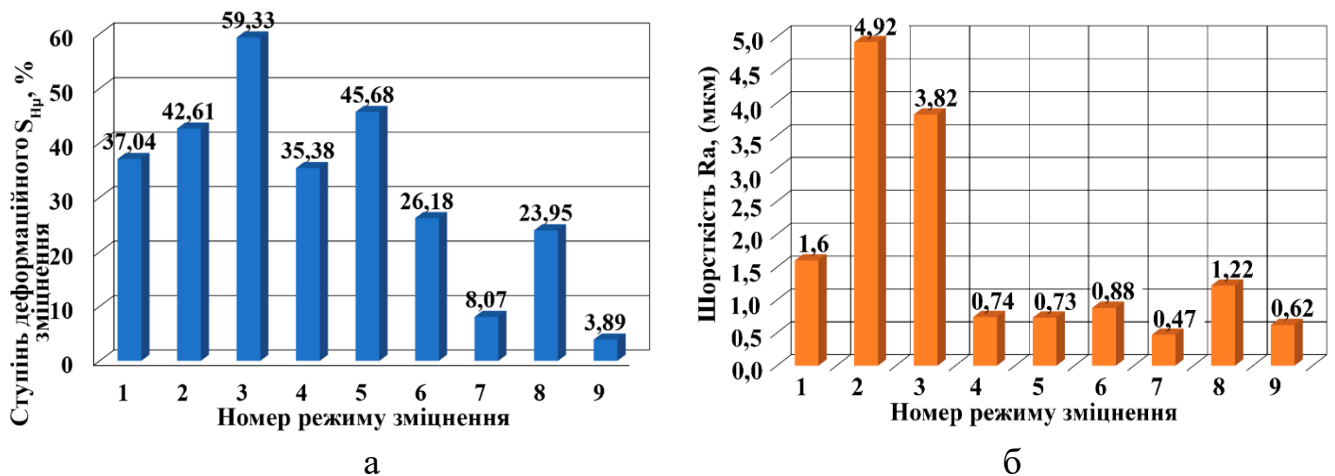
Рис. 11. Поверхня та поверхневий шар зразків, зміцнених за різними режимами: а – без зміцнення; б –  $F=100$  Н,  $S=0,05$  мм/об,  $Rsf=4$  мм; в –  $F=300$  Н,  $S=0,05$  мм/об,  $Rsf=2,5$  мм; г –  $F=300$  Н,  $S=0,1$  мм/об,  $Rsf=2,5$  мм.

$$\begin{aligned}
 P = & 0,25 - 0,1 \cdot R + 3,4 \cdot F^2 + 15,6 \cdot S^2 - 16,8 \cdot Pr^2 - 35 \cdot F \cdot S + 0,6 \cdot F \cdot \\
 & R + 0,7 \cdot R \cdot Pr - 0,4 \cdot F \cdot S \cdot R - 3,4 \cdot F \cdot R \cdot Pr + 72,5 \cdot F^2 \cdot S - 0,03 \cdot R^2 \cdot F - \\
 & 77,7 \cdot F^2 \cdot Pr + 181,9 \cdot F \cdot Pr^2
 \end{aligned} \quad (3)$$

Адекватність моделі оцінювали за критерієм Фішера. Для визначення дисперсії відтворюваності виконували дублювання 11-ти дослідів у центрі плану експерименту. Її однорідність оцінювали за критерієм Кохрена. Табличне значення критерію Фішера при рівні значущості 0,05 ( $P=95\%$ ) та числі ступенів свободи дисперсії адекватності і дисперсії відтворюваності рівному 10 складає  $\Phi_{0,05;10;10}^{\text{табл}} = 2,98$ . Розрахункове значення критерію Фішера склало  $\Phi_{0,05;10;10}^{\text{розра}} = 2,54$ . Враховуючи, що  $\Phi^{\text{розра}} < \Phi^{\text{табл}}$ , отриману регресійну модель можна вважати адекватною.

Враховуючи можливі конструкційні обмеження реальних тонкостінних деталей, оптимальний радіус вигладжувача для забезпечення раціонального поєднання характеристик поверхневого шару становить 2,5 мм, зусилля вигладжування – 300 Н, подача – 0,1 мм/об.

З метою розширення сфери застосування методу селективного лазерного спікання для виробництва деталей ГТД літальних апаратів досліджено вплив режимних параметрів алмазного вигладжування на параметри якості поверхневого шару зразків із нікелевого сплаву INCONEL 718. Визначено, що підвищення показників якості поверхневого шару забезпечується раціональним поєднанням режимних параметрів (рис. 12.).



1 –  $F=200$  Н,  $S=0,05$  мм/об,  $R_{sf}=1$  мм; 2 –  $F=300$  Н,  $S=0,15$  мм/об,  $R_{sf}=1$  мм; 3 –  $F=400$  Н,  $S=0,10$  мм/об,  $R_{sf}=1$  мм; 4 –  $F=300$  Н,  $S=0,10$  мм/об,  $R_{sf}=2,5$  мм; 5 –  $F=400$  Н,  $S=0,05$  мм/об,  $R_{sf}=2,5$  мм; 6 –  $F=200$  Н,  $S=0,15$  мм/об,  $R_{sf}=2,5$  мм; 7 –  $F=300$  Н,  $S=0,05$  мм/об,  $R_{sf}=4$  мм; 8 –  $F=400$  Н,  $S=0,15$  мм/об,  $R_{sf}=4$  мм; 9 –  $F=200$  Н,  $S=0,10$  мм/об,  $R_{sf}=7$  мм.

Рис. 12. Діаграми залежності ступеня деформаційного зміцнення (а) та шорсткості (б) від режимних параметрів алмазного вигладжування

Мінімальна шорсткість поверхні забезпечується застосуванням вигладжувачів з великим радіусом сфери і мінімальною подачею (рис. 13).

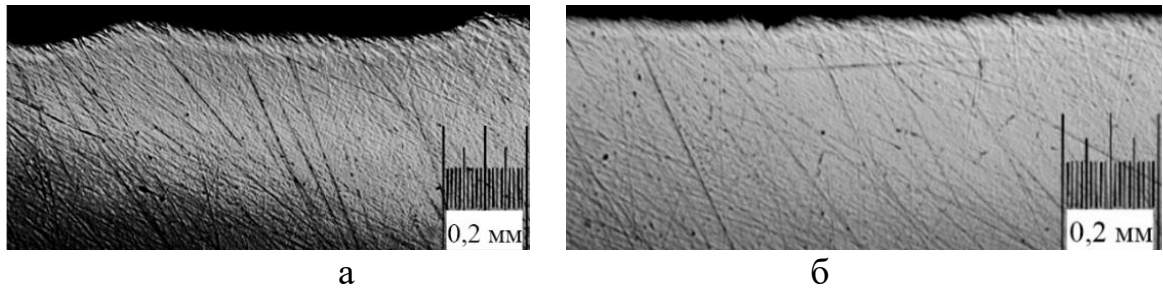


Рис. 13. Профіль поверхонь зразків зі сплаву INCONEL 718, зміцнених алмазним вигладжуванням за різними режимами: а – режим №2(рис. 13); б – режим №7(рис. 13).

Використовуючи діаграми Парето, визначено найбільш статистично значимі режимні параметри вигладжування для отримуваних максимального ступеня деформаційного зміцнення поверхневого шару та мінімальної шорсткості поверхні (рис. 14.).

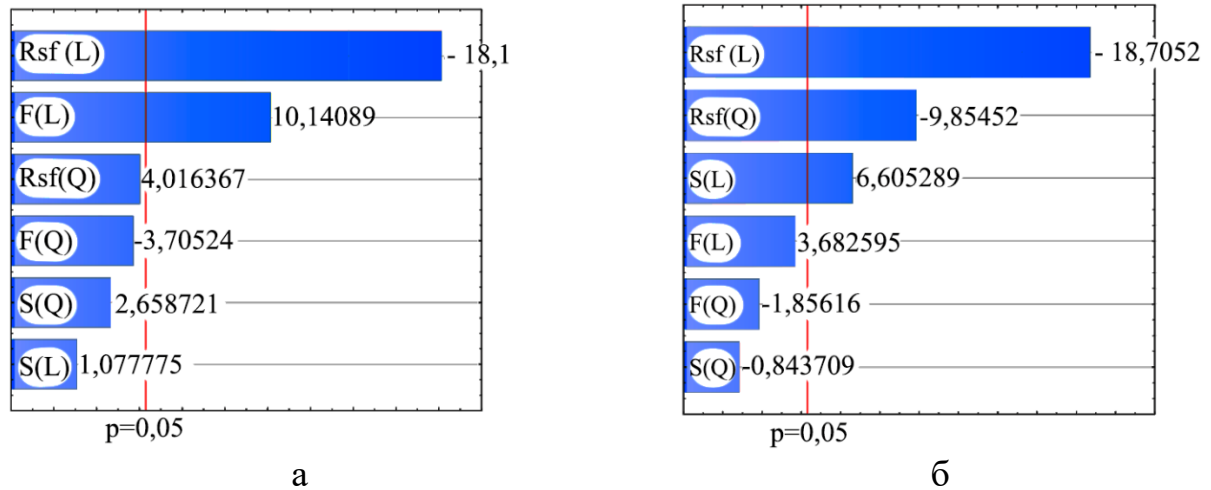


Рис. 14. Діаграми Парето для ступеня деформаційного зміцнення поверхневого шару (а) та шорсткості поверхні (б) зразків

За діаграмами Парето встановлено, що на ступінь деформаційного зміцнення та шорсткість поверхні статистично значимий вплив має радіус сфери алмазного вигладжувача. Подача та зусилля вигладжування мають різну значущість для різних цільових функцій. Отримані рівняння (4, 5) дозволяють прогнозувати вплив режимних параметрів алмазного вигладжування на ступінь деформаційного зміцнення та шорсткість поверхні:

$$S_{H\mu} = 600,12 - 965 \cdot F + 2183,3 \cdot F^2 + 231,3 \cdot S^2 + 11,5 \cdot R_{sf} - 10,5 \cdot R_{sf}^2 \quad (4)$$

$$Ra = 3,17 - 5,28 \cdot F + 10,83 \cdot F^2 + 4,1 \cdot S - 1,46 \cdot R_{sf} + 0,22 \cdot R_{sf}^2 \quad (5)$$

Оптимальний радіус вигладжувача для отримання мінімальної шорсткості поверхні становить 4,0 мм. Проте його не можливо застосувати при зміцненні концентра-

торів напружень невеликого розміру. Для отримання максимального ступеня деформаційного зміцнення необхідно використовувати вигладжувач радіусом 0,5 мм, проте він збільшує шорсткість поверхні. Тому при наданні технологічних рекомендацій для обробки конкретних деталей та забезпечення їх якості необхідно виконувати оптимізацію за усіма параметрами обробки і вибирати режимні параметри з урахуванням отриманих даних. При виборі режимних параметрів слід враховувати, який параметр якості буде найбільш важливим для конкретної деталі, оскільки це визначатиме вибір. Для забезпечення максимального ступеня деформаційного зміцнення та мінімальної шорсткості обробку деталей із жароміцного сплаву INCONEL 718 необхідно виконувати за наступними режимами: зусилля – 250 Н, подача – 0,1 мм/об, радіус сфери – 2,5 мм.

У п'ятому розділі оцінено вплив зазначених технологій з технічної та економічної точок зору.

Визначено вплив алмазного вигладжування місць концентрації напружень на зміну запасу статичної міцності при використанні сплавів на основі алюмініда титану OX45–3ODS та INCONEL 718 (рис. 15). З результатів розрахунку напружено-деформованого стану деталей встановлено, що значні напруження виникають не тільки в області ялинкового пазу (рис. 15а) та прикомлевої зони лопаток (рис. 15б), але й в інших місцях їх концентрації.

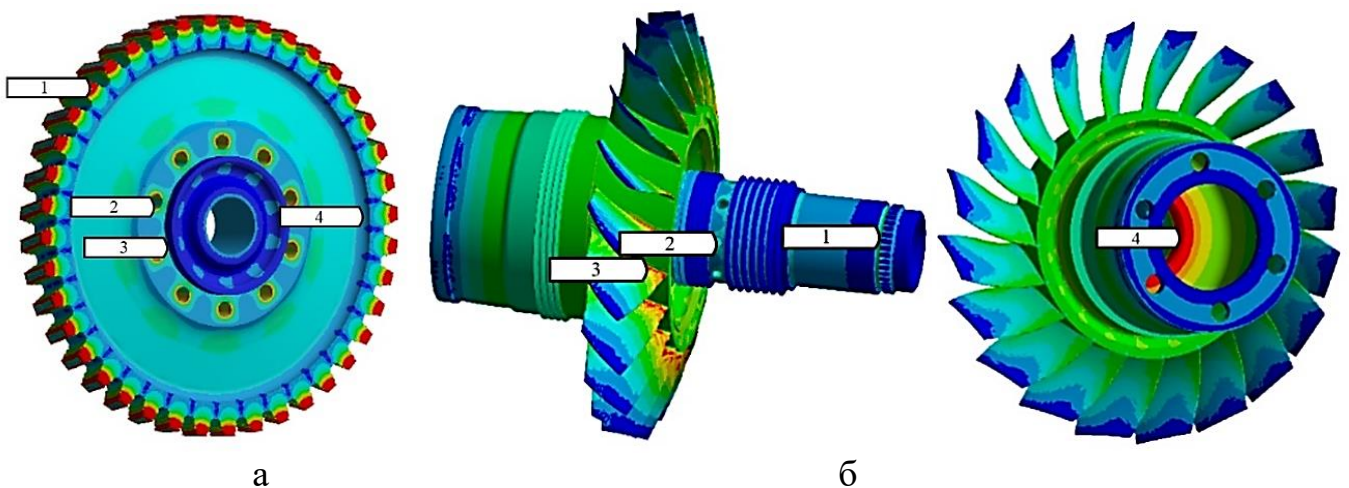


Рис. 15. Місця вимірювання напружень досліджуваних деталей :  
а – диск; б – моноколесо

Виконано оцінку за критерієм величини запасу статичної міцності в різних конструктивних концентраторах напружень моноколеса та диска після алмазного вигладжування (табл. 1).

Застосування селективного лазерного спікання для виготовлення деталей ГТД призводить до зниження запасу статичної міцності в різних конструктивних концентраторах напружень. Проте подальше алмазне вигладжування місць концентрації напружень дозволяє значно підвищити запас статичної міцності та повернути його в допустимі межі, регламентовані нормативами.



## Статичний запас міцності при використанні різних матеріалів

МАТЕРІАЛ / ДЕТАЛЬ	Місце виміру							
	1		2		3		4	
	$\sigma_{\max}$ , МПа	n	$\sigma_{\max}$ , МПа	n	$\sigma_{\max}$ , МПа	n	$\sigma_{\max}$ , МПа	n
<b>ДИСК</b>								
BT 8	255,2	1,92	249,4	1,57	183,2	2,52	171,1	2,69
OX45-3ODS (СЛС)	347,3	1,41	338,5	1,17	240,5	1,94	254,6	1,84
OX45-3ODS (SLS)+AB	241,3	2,06	217,4	1,82	179,4	2,57	174,5	2,68
<b>МОНОКОЛЕСО</b>								
INCONEL 718	162,2	3,48	191,1	2,51	374,9	1,51	305,0	1,57
INCONEL 718 (СЛС)	188,2	3,0	248,6	1,93	410,0	1,38	376,9	1,27
INCONEL 718 (СЛС)+AB	155,9	3,62	172,4	2,78	369,5	1,53	291,8	1,64

Виконано аналіз економічної ефективності застосування селективного лазерного спікання та алмазного вигладжування при виробництві деталей ГТД літальних апаратів.

Альтернативна технологічна схема (рис. 16) не містить заготівельних операцій. Це значно знижує витрати, пов'язані з проектуванням та виготовленням штампового оснащення. Зменшується об'єм механічної обробки поверхонь деталей.

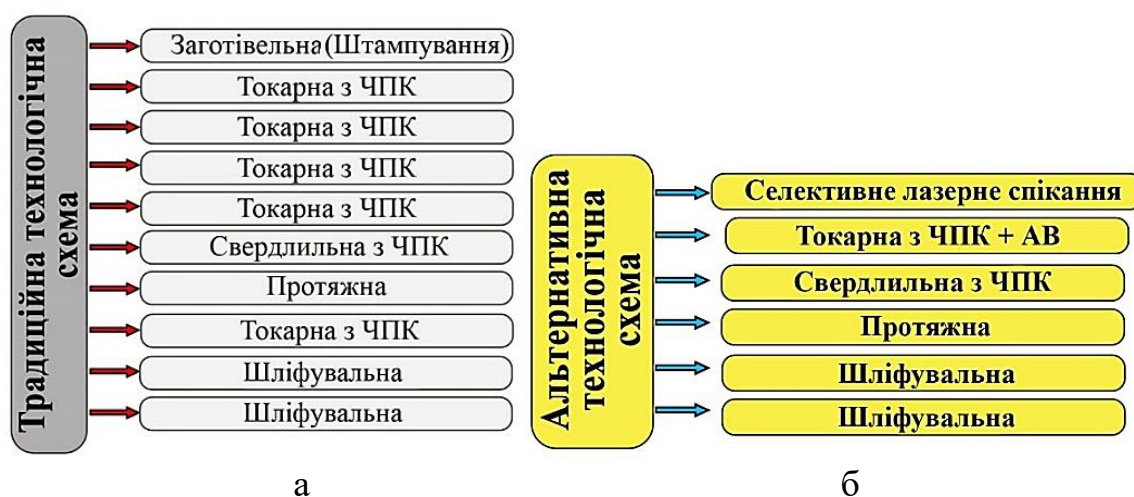


Рис. 16. Технологічні схеми виготовлення деталі типу «Диск»:  
а – традиційна; б – альтернативна

Менша кількість металообробного устаткування знижує потребу у виробничих площах. Знижується необхідна кількість устаткування для виробництва заданої деталі згідно з програмою випуску.

Так, для базового технологічного процесу потрібні 20 верстатів, у той час як за альтернативним технологічним процесом – 10 одиниць (рис. 17).

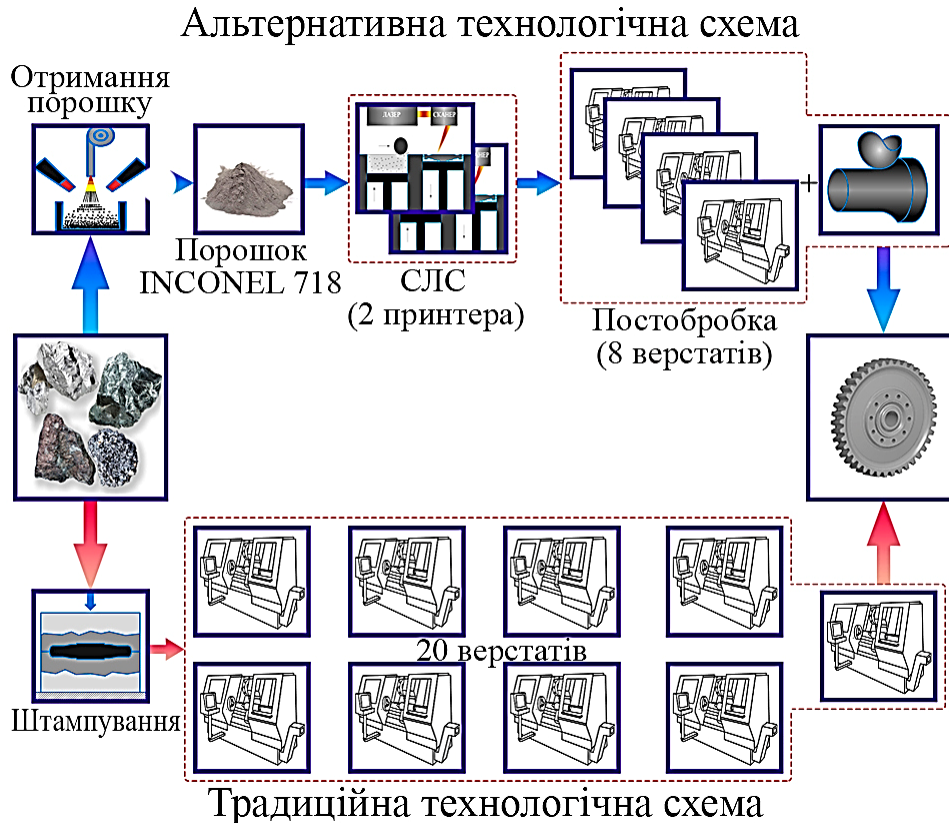


Рис. 17. Порівняння традиційної та альтернативної технологій отримання диска ГТД

Однією з особливостей пропонованого технологічного процесу є те, що зміцнення алмазним вигладжуванням місць концентрації напружень виконується на оброблювальному центрі на останньому технологічному переході обробки деталі.

Собівартість виготовлення деталі типу «Диск» за базовим технологічним процесом становить 56771,11 грн, а за альтернативним – 28430,7 грн. Необхідні капітальні вкладення для впровадження альтернативної технології складають 24386902,87 грн., а при застосуванні базової технології – 25105241,25 грн.

Економічний ефект від впровадження технології селективного лазерного спікання та зміцнення місць концентрації напружень алмазним вигладжуванням при виготовленні деталі типу «Диск» в умовах серійного виробництва склав 28340,41 грн. на одиницю продукції.

## ВИСНОВКИ

У завершеній дисертаційній роботі вирішене актуальне науково-прикладне завдання – підвищення якості деталей газотурбінних двигунів, отриманих селективним лазерним спіканням, шляхом алмазного вигладжування.

Результати роботи дозволяють зробити такі основні висновки:

1. У результаті виконаного літературного аналізу впливу конструктивних концентраторів напружень на якість деталей ГТД літальних апаратів встановлено, що найбільшу концентрацію напружень викликають концентратори типу «поверхня поєднання двох діаметрів» та «поверхня переходу отвору у площину». Теоретичний коефіцієнт концентрації напружень зазначених поверхонь у декілька разів перевищує значення для інших поверхонь.

2. Встановлено, що основними проблемами, які заважають розповсюдженню адитивних технологій у виробництві, є пористість, вартість порошку, рівномірність, чутливість до концентрації напружень, якість поверхневого шару. Для розширення сфери застосування адитивних технологій в авіаційній та космічній галузі використовуються такі методи постобробки, як поверхневе пластичне деформування. Визначено, що основними напрямками підвищення якості деталей, отриманих селективним лазерним спіканням, є застосування алмазного вигладжування для локальної пластичної деформації місць концентрації напружень.

3. Визначена раціональна геометрія алмазного вигладжувача. Для зміцнення конструктивних концентраторів напружень деталей ГТД літальних апаратів необхідно використовувати алмазний вигладжувач з кутом конусу державки  $75^\circ$ . Розроблено оригінальний пристрій, що дозволяє виконувати алмазне вигладжування поверхонь конструктивного концентратора напружень типу «поверхня поєднання двох діаметрів», який забезпечує постійну силу вигладжування під час обробки в усіх точках поверхні. Розроблено оригінальний пристрій, що дозволяє виконувати алмазне вигладжування «поверхні переходу отвору у площину». Розроблено оригінальний пристрій, що дозволяє виконувати алмазне вигладжування площинних поверхонь на верстатах з числовим програмним керуванням.

4. Адаптовано методику визначення залишкових напружень методом зондувального отвору для застосування на поверхнях деталей газотурбінних двигунів. Встановлено, що на точність визначення величини напружень суттєво впливають такі фактори, як ретельність позиціонування свердла відносно площини деталі, температура, фактична глибина свердління на кожному кроці, час витримки на кожній глибині, частота та час опитування датчиків тощо.

5. Встановлено вплив режимних параметрів алмазного вигладжування на формування характеристик якості поверхні, ступеня деформаційного зміцнення, розподілу залишкових напружень, опору втомі при обробці деталей зі сплаву ЕП609–Ш. Визначені раціональні режимні параметри алмазного вигладжування конструктивних концентраторів типу «поверхня поєднання двох діаметрів»: зусилля вигладжування 300 Н, подача 0,07 мм/об, швидкість вигладжування 92 м/хв. Визначені раціональні режимні параметри алмазного вигладжування конструктивних концентраторів типу «поверхня переходу отвору у площину»: зусилля вигладжування 30 Н, подача 0,05 мм/об, швидкість вигладжування 4,71 м/хв.

6. Визначені основні закономірності формування параметрів якості обробленої поверхні та поверхневого шару залежно від параметрів алмазного вигладжувача для деталей, отриманих селективним лазерним спіканням, зі сплаву на основі алюмінідів титану OX45–3ODS та жароміцного нікелевого сплаву INCONEL 718. Встановлено, що раціональними режимними параметрами алмазного вигладжування поверхні зразків зі сплаву на основі алюмініда титану OX45–3ODS є вигладжування із зусиллям 300 Н, подачею 0,1 мм/об, алмазним вигладжувачем радіусом 2,5 мм. Встановлено, що на шорсткість і ступінь деформаційного зміцнення поверхневого шару зразків зі сплаву INCONEL 718 режимні параметри алмазного вигладжування мають різний вплив. Доцільним їх поєднанням, при якому ступінь деформаційного зміцнення і шорсткість є раціональними, є обробка із зусиллям вигладжування 250 Н, подачею 0,1 мм/об, радіусом сфери алмазного вигладжувача 2,5 мм.

7. Встановлено вплив технологічних особливостей обробки та режимних параметрів алмазного вигладжування на параметри пористості. Визначено, що найбільш значимим параметром при дослідженні ефективності застосування алмазного вигладжування для зміцнення матеріалів, отриманих селективним лазерним спіканням, є залишкова пористість. Значний вплив на її величину має початкова пористість, яка може змінюватись в значних межах та розподіл якої має випадковий характер. Встановлено, що алмазне вигладжування ефективно застосовувати для ущільнення поверхневого шару виробів з порошкових матеріалів, на прикладі сплаву на основі алюмініда титану OX45–3ODS. Мінімальні значення залишкової пористості були досягнуті при алмазному вигладжуванні з режимними параметрами: зусилля 0,2...0,3 кН, подача 0,12...0,15 мм/об та радіус сфери алмазного вигладжувача 2,5 мм.

8. На основі проведених досліджень розроблені технологічні рекомендації щодо застосування алмазного вигладжування у промисловому виробництві при обробці деталей ГТД літальних апаратів, отриманих селективним лазерним спіканням.

9. Встановлено, що очікуваний економічний ефект від впровадження запропонованої технології селективного лазерного спікання та зміцнення місць концентрації напружень алмазним вигладжуванням при виготовленні деталі типу «диск» в умовах серійного виробництва склав 28340,41 грн. на одиницю продукції.

### **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Вишнепольский Е.В., Богуслаев В.А., Пухальская Г.В., Гликсон И.Л. Повышение сопротивления усталости тонкостенных валов // *Вісник двигунобудування*. Запорожье, 2007. №2. С. 136 – 141.

*Здобувачем проведено комплексну обробку алмазним вигладжуванням тонкостінних валів зі сталі X12НМБФ–Ш та проаналізовано результати.*

2. Вишнепольский Е.В., Пухальская Г.В., Гликсон И.Л. Повышение сопротивления усталости мест концентрации напряжений в цилиндрических оболочках алмазным выглаживанием // *Вісник двигунобудування*. Запорожье, 2009. №1. С. 90 – 94.

*Здобувачем розроблено методуку зміцнення алмазним вигладжуванням конструктивного концентратора напружень типу «поверхня з'єднання отвору та циліндра».*

3. Вишнепольский Е.В., Павленко Д.В. Формирование качества поверхности деталей из сплава на основе алюминидов титана, полученных по технологии slm алмазным выглаживанием // *Вісник двигунобудування*. Запорожье, 2018. №1. С. 123 – 131.

*Здобувачем проведено обробку зразків алмазним вигладжуванням та аналіз результатів вимірювань.*

4. Вишнепольский Е.В., Павленко Д.В. Эффективность уплотнения некомпактных сплавов алмазным выглаживанием // *Наука и техника*. Минск, 2019. № 18(1). С. 62 – 89.

*Здобувачем запропоновано методику оцінки залишкової пористості після зміцнення та виконано дослідження впливу алмазного вигладжування на зміцнення малопластичних матеріалів .*

5. Вишнепольський Є.В., Павленко Д.В. Алмазне вигладжування деталей з некомпактних сплавів на основі алюмінідів титану // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. Харків, 2020. № 3. С. 43 – 52.

*Здобувачем виконана оцінка параметрів залишкової пористості.*

6. Вишнепольський Є.В., Павленко Д.В., Сідоренко М.В., Писарський А.О. Методологія виміру залишкових напружень методом свердління отворів в тонкостінних складнопрофільних деталях короткоресурсних малорозмірних двигунах літальних апаратів // *Металознавство та обробка металів*. Київ, 2020. № 3/58. С. 9 – 11.

*Здобувачем проведено вимірювання залишкових напружень на складнопрофільній поверхні тонкостінної деталі та виконано удосконалення методики закріплення відповідної деталі.*

7. Vyshnepolskyi Y. et al. Parts Diamond Burnishing Process Regimes Optimization Made of INCONEL 718 Alloy via Selective Laser Sintering Method // 2020 IEEE 10th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP). – IEEE, 2020. – С. 02SAMA01 – 1 – 02SAMA01 – 5.

*Здобувачем проведено обробку партій зразків алмазним вигладжуванням та аналіз результатів вимірювань.*

8. Вишнепольский Е.В., Павленко Д.В., Двирный Я.В. Прогнозируемые эффекты упрочнения алмазным выглаживанием деталей полученных с помощью селективного лазерного спекания // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. Харків, 2020. № 4. С. 43 – 52.

*Здобувачем виконано порівняльний економічний розрахунок варіантів отримання досліджуваних деталей.*

9. Оправка для алмазного вигладжування складнопрофільних поверхонь: патент на корисну модель 36340 Україна: МПК (2006) С21D 7/00; заявл. 29.04.08; опубл. 27.10.08, Бюл. № 20.

*Здобувачем виконано розробка конструкції оправки для алмазного вигладжування складнопрофільних поверхонь.*

10. Пристрій для алмазного вигладжування поверхні з'єднання отвору та циліндра: патент на корисну модель 63243 Україна: МПК (2011) С21D 7/00; заявл. 01.12.10; опубл. 10.10.11, Бюл. № 19. 4 с.

*Здобувачем виконано розробка конструкції пристрою для алмазного вигладжування поверхні з'єднання отвору та циліндра.*

11. Вишнепольский С.В., Богуслаев В.А., Гликсон И.Л. Упрочнение кромок отверстий валов ГТД алмазным выглаживанием // Тезисы докладов международной молодежной научно-технической конференции «Молодежь в авиации: новые решения и перспективные технологии». (м. Алушта, 15 – 18 мая 2007 г). Алушта: АО «Мотор Сич», 2007. С. 180 – 182.

*Здобувачем виконано зміцнення кромок отворів зразків, вирізаних з валу вентилятора ГТ., алмазним вигладжуванням.*

12. Вишнепольский Е.В., Богуслаев В.А., Пухальская Г.В., Гликсон И.Л. Оценка эффективности упрочнения тонкостенных валов алмазным выглаживанием // Тезисы докладов II международной молодежной научно-технической конференции авиамоторостроительной отрасли «Молодежь в авиации: новые решения и перспективные технологии». (м. Алушта, 12 – 16 мая 2008 г). Алушта: АО «Мотор Сич», 2008. С. 90 – 92.

*Здобувачем виконано зміцнення алмазним вигладжуванням кромок отворів на плоских зразках та проведено дослідження на втому.*

13. Вишнепольский Е.В. та ін. Снижения влияния концентрации напряжений в цилиндрических оболочках // Тезисы докладов XII международного конгресса двигателестроителей. (м. Рыбачье, 14 – 19 сентября 2007 г). Харьков: Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», 2008. С. 90 – 92.

*Здобувачем виконано аналіз ефективності застосування алмазного вигладжування для зниження впливу концентрації напружень в циліндричних оболонках.*

14. Вишнепольский Е.В. Снижение влияния конструктивных концентраторов напряжений на сопротивление усталости тонкостенных валов ГТД // Материалы конференции VII международной научно-технической конференции молодых ученых «Проблемы энергосбережения и механизации в горнометалургическом комплексе». (м. Кривой рог, 26 апреля 2011 г). Кривой рог: Криворожский технический университет, 2011. С. 153 – 155.

*Здобувачем виконано дослідження напружено-деформованого стану поверхонь з'єднання отвору та площини різної форми.*

15. Вишнепольский Е.В. Повышение прочностных характеристик поверхности сопряжения отверстия и тонкостенного вала газотурбинного двигателя // Тези доповідей Десятої Всеукраїнської молодіжної науково-технічної конференції «Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво». (м. Суми, 26 – 30 жовтня 2010 р). Суми: СумДУ, 2010. С. 19 – 21.

*Здобувачем виконано розробку методології забезпечення постійності форми поверхні з'єднання отвору та валу за периметром отвору.*

16. Вишнепольский Е.В., Дядя С.І. Устройство для обработки и упрочнения поверхности сопряжения радиального отверстия и вала // Тези доповідей XII Всеукраїнської молодіжної науково-технічної конференції «Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво». (м. Київ, 2010 р). Київ: Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», 2012. С. 36 – 37.

*Здобувачем розроблено конструкцію пристрою для обробки та зміцнення поверхні спряження радіального отвору та валу.*

17. Вишнепольский Е.В., Дядя С.І. Влияние алмазного выглаживания на макро-структуру поверхностного слоя тонкостенных валов ГТД // Збірник матеріалів Міжнародної науково-технічної конференції «Машинобудування України очима молодих». (м. Кременчук, 2013 р). Кременчук: КрНУ ім. Михайла Остроградського, 2013. С. 45 – 46.

*Здобувачем виконані дослідження впливу алмазного вигладжування на макро-структуру поверхневого шару тонкостінних валів ГТД.*

18. Вишнепольский Е.В., Дядя С.І. Проблемы формирования поверхности отверстий на валах ГТД под последующее алмазное выглаживания // Тези доповідей XIV Всеукраїнської молодіжної науково-технічної конференції «Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво». (м. Суми, 27 – 31 жовтня 2014 р). Суми: СумДУ, 2014. С. 18 – 19.

*Здобувачем виконано обробку поверхонь отворів та оцінку особливостей формування поверхні після обробки .*

19. Вишнепольский Е.В. Применение алмазного выглаживания для обработки материалов различных классов // Тезисы докладов XI Международные молодежные научно-технические чтения им. А.Ф. Можайского. (г. Запорожье, 14 – 17 мая 2018 г.) Запорожье: АО «Мотор Сич», 2018. С. 172 – 174.

*Здобувачем виконана оцінка можливості застосування алмазного вигладжування для зміцнення різних матеріалів.*

20. Вишнепольский Е.В., Дядя С.І. Методичне забезпечення дослідження процесу обробки радіальних та фланцевих отворів на валах ГТД // Прогресивні технології в машинобудуванні: збірник наукових праць III Всеукраїнської науково-технічної конференції, (м. Львів 2 – 6 лютого 2015 р.) Львів: Національний університет «Львівська політехніка». 2015. С. 46 – 47.

*Здобувачем запропоновано схеми обладнання для обробки фланцевих та радіальних отворів.*

## АНОТАЦІЯ

**Вишнепольський Є.В. Підвищення якості деталей газотурбінних двигунів, отриманих селективним лазерним спіканням, шляхом алмазного вигладжування.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 131 – Прикладна механіка – Національний університет «Львівська політехніка», МОН України, Львів, 2023.

Дисертацію присвячено вирішенню важливого науково-прикладного завдання щодо розширення сфери застосування адитивних технологій та підвищення якості поверхневого шару деталей, виготовлених з нікелевих сплавів та сплавів на основі алюмініда титану, отриманих за допомогою селективного лазерного спікання.

У дисертаційній роботі вперше на основі наукового підходу виконано аналіз літературних джерел та відомих досліджень, присвячених визначенню впливу на якість деталі конструктивних концентраторів напружень, обґрунтовано застосування алмазного вигладжування для їх зміцнення. Виконано оцінку теоретичних та практичних

підходів щодо застосування алмазного вигладжування для зміцнення конструктивних концентраторів напружень деталей, отриманих за допомогою традиційних та адитивних технологій, насамперед селективного лазерного спікання. Визначено закономірності формування якості поверхневого шару деталей, виготовлених зі сплаву ЭП609- Ш, після алмазного вигладжування та його вплив на опір втомі. Встановлено закономірності формування якості поверхневого шару при зміцненні конструктивних концентраторів напружень деталей, виготовлених зі сплаву INCONEL 718 та сплаву на основі алюмініда титану OX45–3ODS, на підставі комплексного дослідження характеристик поверхневого шару і впливу на них технологічних чинників алмазного вигладжування у взаємозв'язку зі зміною геометрії вигладжувача.

Встановлено вплив залишкової пористості поверхневого шару, деталей зі сплаву на основі алюмініда титану OX45–3ODS після селективного лазерного спікання, на ефективність алмазного вигладжування. Визначено величину та закономірності впливу режимних параметрів алмазного вигладжування на параметри залишкової пористості.

Розроблено технологічні рекомендації щодо використання алмазного вигладжування (раціональні режими і умови обробки, геометрія інструментів і обмеження їх використання для обробки конструктивних концентраторів напружень), щодо забезпечення високої якості і продуктивності при зміцненні поверхонь деталей ГТД. Визначено економічну ефективність від застосування селективного лазерного спікання та алмазного вигладжування, яка склала 28340,41 грн.

**Ключові слова:** алмазне вигладжування, якість поверхні, конструктивні концентратори напружень, напружено-деформований стан, технологічний процес, зміцнююча обробка, селективне лазерне спікання, газотурбінний двигун, алюмінід титану.

## ANNOTATION

**Vyshnepolskyi E. V. Improving the quality of gas-turbine engine parts produced by selective laser sintering by means of diamond smoothing. – On the Rights of a Manuscript**

The thesis for the scientific degree of Candidate of Technical Sciences in the specialty 131 – Applied Mechanics – L'viv Polytechnic National University, MES of Ukraine, L'viv, 2023.

The thesis is dedicated to the solution of an important scientific and applied task regarding the expansion of the field of additive technologies application and the quality improvement of the surface layer of nickel alloys and alloys based on titanium aluminide parts obtained by selective laser sintering.

In the thesis, for the first time, on the basis of the scientific approach, the analysis of the literature sources and the known researches devoted to the definition of influence on the part quality of structural stress concentrators was performed and the usage of diamond smoothing for their strengthening was justified. It has been established that the main problems that prevent the proliferation of additive technologies in the production are porosity, powder cost, uniform strength, sensitivity to stress concentration and the quality of the surface layer. Such a post-processing method as surface plastic deformation was used to expand the scope of additive technologies application in the aviation, rocket and space industries. It



was determined that the main directions for improving the quality of parts obtained by selective laser sintering were the use of diamond smoothing for local plastic deformation of stress concentration locations. The evaluation of theoretical and practical approaches regarding the usage of diamond smoothing to strengthen of the structural stress concentrators of parts obtained by traditional and additive technologies, primarily selective laser sintering, was carried out. The regularities of the surface layer quality formation of parts made of EP609 alloy after diamond smoothing and its effect on fatigue resistance were determined. The main regularities of the quality parameters formation of the processed surface and the surface layer depending on the parameters of the diamond smoother for parts obtained by selective laser sintering, made of the alloy based on titanium aluminides OX45–3ODS and heat-resistant nickel alloy INCONEL 718, were determined. It was established that the regime parameters of diamond smoothing had different effects on the roughness and the degree of deformation strengthening of the surface layer of INCONEL 718 alloy samples. The values of the processing regimes that ensured minimal roughness and rational value of deformation strengthening were determined.

The further development of the perception about the influence of the diamond smoothing regime parameters of structural stress concentrators of parts made of EP609 alloy on fatigue resistance was derived, which made it possible to establish their rational combinations, from the point of view of ensuring the safety margin of GTE parts.

The influence of the surface layer initial porosity of the parts made of titanium aluminide-based alloy OX45–3ODS after selective laser sintering on the diamond smoothing efficiency was established. The effect of technological features of processing and regime parameters of diamond smoothing on porosity parameters was determined. It was established that the most significant parameter in the study of the effectiveness of the diamond smoothing application for strengthening materials obtained by selective laser sintering was the residual porosity. The initial porosity, which can vary significantly and whose distribution is random, has had a significant impact on residual porosity value. It was established that diamond smoothing could be effectively applied to densify the surface layer of products made of powder materials, for example, alloy based on titanium aluminide OX45–3ODS. The rational regimes were determined that ensured the minimum value of residual porosity.

Technological recommendations regarding the usage of diamond smoothing (rational regimes and conditions of processing, geometry of tools and restrictions of their usage for structural stress concentrators processing) for ensuring high quality and productivity during surfaces strengthening of GTE parts were formulated. For the first time, special technological equipment was developed that allowed to perform diamond smoothing of structural stress concentrators such as "surface of two diameters combination" and "surface of the hole-to-plane transition" types. The original device was developed that allowed to perform diamond smoothing of curvilinear planar surfaces. The economic efficiency of selective laser sintering and diamond smoothing implementation was determined, which amounted to UAH 28340,41.

**Key words:** diamond smoothing, surface quality, structural stress concentrators, stress-strain state, technological process, strengthening treatment, selective laser sintering, gas turbine engine, titanium aluminide.

Підписано до друку 02.02.2023. Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 1,5

Тираж 100 прим. Зам. № 1029

Національний університет «Запорізька політехніка»

Україна, 69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64

Тел.: (061) 769-82-96, 220-12-14

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6952 від 22.10.2019