

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет будівництва, архітектури та дизайну
(повне найменування інституту, факультету)

Композиційних матеріалів, хімії та технологій
(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)

магістр

(ступінь вищої освіти)

на тему ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТА ДОВГОВІЧНОСТІ

МАТЕРІАЛУ ЛОПАТКИ КОМПРЕСОРА ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА

Виконав: студент 2 курсу, групи БАД-222м

Спеціальності 132-Матеріалознавство
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація) Композиційні та
порошкові матеріали, покриття

Олег ЛУК'ЯНЕНКО

(прізвище та ініціали)

Керівник Іван АКІМОВ

(прізвище та ініціали)

Рецензент Дмитро ПАВЛЕНКО

(прізвище та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»
(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет будівництва, архітектури та дизайну
Кафедра «Композиційні матеріали, хімія та технології»
Ступінь вищої освіти магістр
Спеціальність 132 Матеріалознавство
(код і найменування)
Освітня програма (спеціалізація) Композиційні та порошкові матеріали,
покриття
(назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри КМХТ

 проф. Мігяєв О.А.

«20» жовтня 2023 року

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

Лук'яненко Олега Леонідовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Підвищення надійності та довговічності матеріалу лопатки компресора газотурбінного двигуна.

керівник проекту (роботи) Акімов Іван Васильович, к.т.н., доцент,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «17» жовтня 2023 року №391

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 18.12.2020

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Матеріали лопаток авіадвигунів, умови роботи лопатки авіадвигуна.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

1) Вступ.

2) Стан питання з технологічного формування характеристик поверхневого шару лопаток компресора.

3) Методичне забезпечення експериментальних досліджень. Опис об'єкта дослідження. Опис методів оздоблювально-зміцнювальної та комплексної обробки пера лопатки. Інші методики досліджень.

4) Опис закономірностей формування характеристик поверхневого шару лопаток технологічними методами. Викладення результатів досліджень та їх висновки.

5) Оцінка впливу обробно-зміцнювальної на несучу здатність лопаток.

6) Висновки.

7) Перелік посилань.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1) Креслення «лопатка і-й ступені компресора двигуна тв3-117».

- 2) Формування шорсткості поверхні пера лопаток після комплексного оброблення.
- 3) Графіки мікротвердості пера лопаток.
- 4) Графіки залишкових напружень в поверхневому шарі лопаток.
- 5) Визначення адгезійної міцності покриттів.
- 6) Напружено-деформований стан лопатки з імітацією пошкоджень вхідній кромки
- 7) Графік розподілу максимальних напружень на пері лопатки з пошкодженнями.
- 8) Результати прискорених випробувань на витривалість лопаток після комплексного оброблення.
- 9) Графіки кривих витривалості лопаток.
- 10) Графічне відображення розповсюдження втомних тріщин та злами лопаток.
- 11) Графічне відображення результатів ударних випробувань лопаток.
- 12) Фото зламів лопаток після ударних випробувань.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	Прийняв виконане завдання
1-4	Акімов І.В. к.т.н., доцент		
1-4	Павленко Д.В. д.т.н, професор		
1-4	Савченко В.О. к.т.н., доцент		
	Перевірка на плагіат. Петрашов О.С.		

7. Дата видачі завдання «20» жовтня 2023 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1)	Літературний аналіз	30.10.23	
2)	Опис методів оздоблювально-зміцнювальної та комплексної обробки пера лопатки. Деформаційне зміцнення кульками в ультразвуковому полі	15.11.20	
3)	Оцінка шорсткості поверхні лопаток. Дослідження мікротвердості поверхні пера.	25.11.23	
4)	Оцінка впливу обробно-зміцнювальної та комплексної обробки на несучу здатність лопаток.	05.12.23	
5)	Вплив оздоблювально-зміцнювальної та комплексної обробки пера лопаток на опір втоми.	15.12.23	
6)	Висновки.	15.12.23	

Студент(ка)


(підпис)

Луцькевич О.П.
(прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи)


(підпис)

Акімов І.В.
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Робота складається з 106 сторінки, 51 рисунків, 23 таблиць.

Об'єктом роботи є лопатка першій ступені компресора вертолітного двигуна, які виготовлені з титанових сплавів.

Мета роботи вивчення характеристик поверхні лопаток компресора після використання різноманітних методів поверхневої обробки з нанесенням ерозійностійкого покриття, а також їх вплив на несучу здатність.

Щоб вирішити ці питання було запропоновано наступні етапи виконання робіт:

1. Проведення аналізу ушкоджень, які виникають в експлуатації та оцінка впливу на зміну концентрації напружень.

2. Визначити оптимальні режими оздоблення поверхні лопатки та провести експериментальні дослідження витривалості, опору до удару, міцності, витривалості, а також адгезійної міцності плівкових покриттів.

Методи дослідження включали: металографічні; методи інженерної механіки; методи математичної статистики – для обробки результатів випробувань та отримання кореляційних залежностей.

Ключові слова: ЛОПАТКА, ДВИГУН, ТИТАНОВИЙ СПЛАВ VT8, АДГЕЗІЙНА МІЦНІСТЬ, ПОКРИТТЯ, ОБЛАДНАННЯ, МЕТОДИКА, ЗАЛИШКОВІ НАПРУЖЕННЯ, НІТРІДТИТАНОВЕ ПОКРИТТЯ, ЕРОЗІЙНІСТЬ, МІКРОДЕФЕКТ, ЕКСПЛУАТАЦІЯ, РЕСУРС

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
Розділ 1 Стан питання з технологічного формування характеристик поверхневого шару лопаток компресора.....	8
1.1 Умови роботи, пошкодження та напружений стан лопаток в експлуатації.....	9
1.2 Формування характеристики поверхневого шару пера лопаток при зміцненні оздоблювально-зміцнювальними та комплексними методами.....	12
1.3 Вплив характеристик поверхневого шару на опір втоми, ударну міцність та зносостійкість.....	18
Розділ 2 Методичне забезпечення експериментальних досліджень.....	24
2.1 Опис об'єкта дослідження.....	24
2.2 Методи оздоблювально-зміцнювальної та комплексної обробки пера лопатки.....	25
2.2.1 Деформаційне зміцнення кульками в ультразвуковому полі.....	25
2.2.2 Іонно-плазмове нанесення покриттів методом КІБ.....	26
2.3 Методика та обладнання для випробувань на втому лопаток.....	27
2.4 Методика випробування лопаток на ударну міцність.....	32
2.5 Дослідження залишкового напруженого стану поверхневого шару лопаток.....	35
2.5.1 Методика визначення залишкових напружень та параметрів наклепу.....	35
2.6 Методика дослідження адгезійної міцності покриттів методом КІБ.....	38
2.7 Послідовність виконання експериментів.....	40
2.8 Висновки.....	41
Розділ 3 Вплив способів обробки на поверхневий шар лопаток компресора...	42
3.1 Оцінка шорсткості поверхні лопаток.....	42

3.2 Дослідження мікротвердості поверхні пера лопаток технологічними методами.....	44
3.3 Формування залишкових напружень в на поверхні лопаток.....	51
3.3.1 Визначення залишкових напружень механічним методом.....	51
3.4 Визначення адгезійної міцності покриттів методом КІБ.....	55
3.5 Висновки.....	58
Розділ 4 Оцінка впливу обробно-зміцнювальної та комплексної обробки на несучу здатність лопаток.....	60
4.1 Визначення напружено-деформованого стану лопатки компресора з концентраторами напружень.....	60
4.2 Вплив оздоблювально-зміцнювальної та комплексної обробки пера лопаток на опір втоми	68
4.3 Вплив комплексної обробки на ударну міцність лопаток.....	82
4.4 Висновки.....	96
Загальні висновки.....	98
Перелік використаних джерел.....	100

ВСТУП

Лопатки компресора газотурбінного двигуна (ГТД) у процесі експлуатації працюють в умовах впливу високочастотних знакозмінних навантажень, відцентрових сил та зіткнення частинками пилу, бруду, води тощо.

Основним видом відмов лопаток в експлуатації є втомні руйнування, які ініціюються ерозійними ушкодженнями, технологічними мікрodefектами і, в окремих випадках, руйнуваннями кромek пера при зіткненні з чужорідними тілами, які потрапляють у тракт двигуна.

Цю проблему можна вирішити за допомогою використання технологічних методів обробки з нанесенням ерозійностійкого покриття.

Найбільш навантажена деталь компресора вертолітного двигуна ТВЗ-117 є лопатка зі сплаву ВТ8М, яка найчастіше зазнає пошкоджень у процесі тривалої експлуатації.

Сплав ВТ8М – є дуже міцний, але чутливий до наявності технологічних мікрodefектів і експлуатаційних пошкоджень.

Тому наукове обґрунтування комплексної обробки, а також дослідження впливу режимів на формування характеристик поверхневого шару, а також несучу здатність лопаток компресора, розробка багатьох технологічних рекомендацій щодо її застосування є актуальними, необхідними та своєчасними.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПИТАННЯ З ТЕХНОЛОГІЧНОГО ФОРМУВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ЛОПАТОК КОМПРЕСОРА

1.1 Умови роботи, пошкодження та напружений стан лопаток в експлуатації

Лопатки вертолітного двигуна ТВЗ-117 працюють у несприятливих умовах: при зльоті та посадці відбувається їх зіткнення з сторонніми тілами у вигляді піщинок та інших неметалевих частинок, що призводить до інтенсивного ерозійного пошкодження поверхні пера та подальшого втомливого руйнування.

Поява ушкоджень пера лопатки у вигляді вибоїн, рисок, збільшує рівень локальних вібронпружень і підвищує ймовірність втомного руйнування. Ушкодження від попадання сторонніх предметів створюють серйозну проблему, оскільки призводять до додаткових витрат від зміни великої кількості лопаток, перебирання двигуна та балансування ротора.

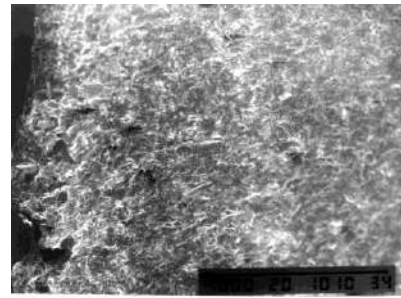
Характер розподілу ушкоджень по перу лопаток, зазвичай, наступний - більша частина вибоїн розташовується на вхідній кромці і у верхній зоні на кориті, що прилягає до вхідної кромки.

Ерозія поверхні пера лопаток може бути викликана піском, пилом, частинками води тощо. Ерозія найбільше характерна для робочих лопаток компресорів, що працюють на запиленому або вологому повітрі. Вона походить від ударів об лопатки крапель води або частинок пилу, що містяться у повітрі. Ерозія поступово розвивається, добре помітна при огляді лопаток на двигуні. Тому лопатка, що має ерозійне ушкодження, дефектується до руйнування під час проведення поточних ремонтів двигуна.

На рис. 1.1 показано лопатку I-й ступені компресора двигуна ТВЗ-117 та ділянку пера з боку корита з ерозійними ушкодженнями, що має напрацювання 1950 год.



а



б

Рисунок 1.1 – Лопатка з ерозійними пошкодженнями пера (а) та ділянка пера лопатки (б – X50) – напрацювання 1950 год.

Джерелами зародження втомних тріщин, які призводять до руйнування багатьох робочих лопаток компресора, можуть бути поверхневі дефекти, дефекти структури матеріалу, які утворюються в процесі виготовлення та експлуатації [2].

Автори роботи [3] показали, що ресурс авіаційних деталей визначається несприятливим впливом експлуатаційних та технологічних дефектів на опір втоми. У лопатках компресора трапляються дефекти, зіткненням з сторонніми тілами викликані та ерозією. Технологічні дефекти трапляються порівняно рідше.

Лопатки компресора мають чутливість до пошкоджень від зіткнення зі сторонніми тілами через наявність у них тонких вихідних та вхідних кромek [4]. Визначено, що більшість забоїв розташована на вхідній кромці і на поверхні корита.

Втомне руйнування в основному починається у деякої неоднорідності, що викликає концентрацію напружень. Межа плинності найбільшою мірою характеризує опір втомному руйнуванню [5]. При розгляді процесу втомного руйнування матеріалів можна виділити два періоди: період зародження та період поширення тріщин [6]. Як на стадії зародження, так і поширенні тріщини втоми відбувається пластична деформація матеріалу.

При дослідженні титанового сплаву VT9 [7] встановлено, що мікротріщини зароджуються на ранніх стадіях циклічного навантаження. Причиною зародження та прискореного росту коротких тріщин втоми є локальна пластична деформація, що виникає в ослабленому поверхневому шарі.

Застосування тонкоплівкових ерозійностійких покриттів, отриманих на основі вакуум-плазмових технологій, набуває все більшого поширення, особливо для лопаток компресора та інших деталей, що працюють при знакозмінних навантаженнях.

Вихід з ладу деталі з покриттям у процесі експлуатації може відбуватися в результаті відшаровування покриття від основи (порушення адгезійної міцності) або руйнування самого покриття (когезійне розтріскування) можуть настати під дією залишкових напружень ще до початку експлуатації [8]. У роботі [8] показано, що збільшення залишкових напружень на контактній поверхні призводить до зниження міцності зчеплення.

На поверхні пера лопаток у процесі різних видів фінішної обробки утворюються технологічні мікродефекти, що сприяють зародженню тріщин втоми, особливо на вхідних і вихідних кромках. У роботі [9] показано, що навіть мікроскопічні ушкодження підвищують ймовірність зародження втомних тріщин та знижують опір втоми при значному збільшенні розсіювання довговічності.

Відмінності поверхневого шару від серцевини деталі полягають у наявності адсорбованих домішок та різних дефектів [10]. Окисна плівка може досягати товщини від 2 до 10 нм. Через пористу структуру оксидів більшість іонів і молекул, що знаходяться в них, має значні коефіцієнти дифузії. При взаємодії поверхні з обсягом у процесі циклічного навантаження відбувається формування приповерхневого шару з особливими властивостями та подальший вплив його на характеристики міцності.

У роботі [11] представлений розрахунок міцності лопаток при зіткненні з стороннім тілом. Прийняте припущення, що тіло, що ударяє, при ударі рухається спільно з лопаткою. Показано, що у межах пружності деформаційне зміцнення позитивно впливає на міцність лопаток. Однак, висновок про те, що для пластичних

матеріалів у граничному стані залишкові напруження можна не враховувати при розрахунку лопаток на ударну міцність є неоднозначним.

У роботі [12] розроблено критерій для оцінки впливу стискаючих залишкових напружень на збільшення межі витривалості (σ_{-1}) при руйнуванні деталей з концентраторами напружень у разі симетричного циклу навантаження.

Вплив залишкових напружень на σ_{-1} за наявності наклепу на дні надрізу залишається таким самим, як і без нього. Критична глибина нерозповсюдженої тріщини втомних в зміцненій деталі з концентратором визначається тільки розмірами поперечного перерізу і не залежить від виду поверхневого зміцнення, матеріалу, типу та розміру концентратора та величини залишкових напружень, що стискають.

Автори роботи [13] розглянули ударну міцність стрижня з постійним поперечним перерізом з урахуванням місцевих контактних деформацій у зоні зіткнення з чужорідним тілом.

Розраховане напруження циклічного вигину для неукріпленого стрижня складало 486 МПа, для зміцненого - 550 МПа, що підтверджує позитивний вплив залишкових стискаючих напружень на опір втомних.

Таким чином, більшість авторів вважає, що поверхневі дефекти можуть спричинити зародження втомних тріщин. Навіть мікроушкодження на поверхні кромки пера лопатки підвищують ймовірність зародження втомних тріщин.

Відповідно, що ступінь впливу поверхневих дефектів встановлюється рівнем концентрації напружень, яку вони спричиняють, рівнем і знаком залишкових напружень. Привертає увагу суперечливість результатів теоретичних досліджень характеристик багатоциклової втомних лопаток у процесі експлуатації. Велике значення мають умови експлуатації, що визначають інтенсивність ерозійних ушкоджень.

Слід зазначити необхідність розгляду як чинників, які впливають на зародження втомних тріщин в лопатках компресора в експлуатації, а й розрахувати рівень концентрації напружень, створюваний ушкодженнями на кромках. Доцільно розрахувати зміцнену натурну лопатку на ударну міцність.

1.2 Формування характеристик поверхневого шару пера лопаток при зміцненні оздоблювально-зміцнювальними та комплексними методами

Аналіз руйнувань лопаток в експлуатації та результатів випробувань на втому при багатоциклового навантаженні показує, що забезпечення їхньої несучої здатності значною мірою залежить від характеристик поверхневого шару, які вийшли на фінішних операціях технологічного процесу.

Формування таких характеристик поверхневого шару лопаток компресора які виготовленні з титанових сплавів при різних оздоблювально-зміцнювальних методах обробки відбувається в результаті взаємопов'язаних явищ, що відбуваються при багаторазових пружно-пластичних деформаціях, що призводять до зміни пластичних властивостей металу, фазового складу та мікроструктури.

На опір втоми лопаток компресора істотно впливають такі характеристики поверхневого шару [14], параметри наклепу, залишкових напружень, шорсткості і характеру мікрорельєфу.

Характер формування залишкових напружень при деформаційному зміцненні кульками розглянуто у роботі [15]. Дослідження виконані на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-2 у $\text{CuK}\alpha$ – випромінюванні. Дробеструменева обробка кульками зразків зі сплавів ВТ3-1 і ВТ22 на всіх режимах призводить до формування стискаючих залишкових напружень, величина і характер розподілу яких залежить від тиску повітря P і часу обробки τ .

Автори роботи [16] виконали дослідження на прямокутних зразках з вимірюванням радіусу кривизни зразка та визначили залишкові напруження у вакуум-плазмових покриттях ($\sigma_{\text{ост}} = -500 \dots 270$ МПа). Стискаючі напруження збільшуються зі зростанням товщини до деякого граничного значення, після чого починають знижуватися.

Фізико-механічні характеристики матеріалу поблизу поверхні значно відрізняються від таких у серцевині лопатки. Так у роботах [17] було виявлено переважну пластичну течію у приповерхневих шарах кристалів на початкових

стадіях деформування. Істотна відмінність у величині межі плинності приповерхневого шару та характері залежності контактних напружень від величини деформації було отримано в роботах [18, 19, 20].

У роботі [21] представлені результати досліджень характеристик поверхневого шару лопаток I ступені компресора зі сплаву ВТ8, оброблених віброполіруванням (ВП), ультразвуковим зміцненням кульками (УЗЗ) та пневмодробеструйним зміцненням кульками (ПДЗ). Встановлено, що рівень залишкової стискаючих напружень на кромці лопатки менше, ніж на спинці, що пояснюється її меншою товщиною і меншою жорсткістю в порівнянні з зоною S_{\max} . Так після УЗЗ рівень стискаючих напружень на кромці менше приблизно в 1,5 рази, ніж на спинці.

У роботах [22, 23] утворення залишкових стискаючих та розтягуючих напружень пов'язують з нерівномірною пластичною деформацією поверхневих шарів, що супроводжується процесами зсуву, переорієнтації та дроблення складових структури. Це призводить до збільшення питомого обсягу пластично деформованого металу в межах 0,3...1,1%, пропорційного до підвищення ступеня наклепу.

Властивості та працездатність плазмових покриттів значною мірою визначаються залишковими напруженнями, сформованими в процесі їх нанесення. На величину залишкових напружень можуть впливати фазові перетворення в плівках, утворення та анігіляція структурних дефектів, поверхневий натяг на межі розділу плівки-підкладка та ін.

При іонно-плазмових методах нанесення покриттів значний внесок у величину і знак залишкових напружень вносить термічна компонента.

Працездатність деталей залежить від стану поверхневого шару, який можна змінити шляхом нанесення функціональних покриттів та методами поверхневого зміцнення [24].

Дислокації невідповідності можуть не утворюватися, якщо ступінь невідповідності параметрів ґрат плівки та підкладки нижче за певні критичні величини. Зародження дислокацій невідповідності є активованим процесом.

Цікавим є підхід, що пояснює виникнення залишкових напружень, з погляду спотворень, створюваних бомбардуванням поверхневих шарів матеріалу різними іонами.

Зрозуміло, якщо проаналізувати данні з літератури, то можна зробити висновок, що залишкові напруження в поверхневих шарах твердих тіл при нанесенні іонно-плазмових покриттів є результатом сумарного впливу термічної складової та іонного бомбардування поверхні підкладки.

Методами рентгеноструктурного аналізу провели дослідження на вплив параметрів процесу напилення покриттів методом КІБ (катодно-іонне бомбардування) на фазовий склад, кристалографічну текстуру, залишкові макронапруження та спотворення ґрат. Встановлено фазові стани, причому у всіх випадках δ -Ті домінує. Текстура цього нітриду однокомпонентна, сильно виражена з орієнтуванням (111). Паралельно площині підкладки і зрідка спостерігається двокомпонентна текстура (111)+(100). Покриття характеризуються високими напруженнями, що стискають, що досягають 3000 МПа.

У роботі [25] показано формування характеристик лопаток компресора з титанових сплавів обробно-зміцнюючою обробкою. Для аналізу зміни кристалографічної орієнтації зерен було застосовано відносини інтенсивностей двох пар дифракційних ліній α -фази – q та n.

Встановлено, що після ВП (віброполірування) та УЗЗ показники n та q на кромках менші, ніж на спинці, що пояснюється різною кристалографічною орієнтацією зерен, спричиненою неоднаковою деформацією окремих ділянок лопатки.

Вплив комплексної обробки формування характеристик поверхневого шару також розглянуто у роботі [26]. Зазначається, що іонно-плазмове азотування не впливає формування параметрів шорсткості поверхні. Дослідження залишкового напруженого стану рентгеноструктурним методом пера лопаток I ступені компресора з металу VT8M показало наявність масштабного чинника, тобто. зниження рівня стискаючих напружень із зменшенням товщини пера лопатки.

Встановлено методом кінетичного макроіндентування, що середнє значення умовної межі плинності $\sigma_{0,2}$ після комплексної обробки (іонно-плазмове азотування (ІПА+УЗЗ)) збільшився з 1050 МПа (ВП) до 1490 МПа), а модуль пружності з $1,27 \cdot 10^5$ МПа до $1,69 \cdot 10^5$ МПа.

У роботі [27] розглянуто вирішення проблеми зносостійкості лопаток компресора з титанових сплавів іонно-плазмовим азотуванням з подальшим зміцненням кульками.

Після напрацювання в експлуатації на вхідній кромці і корит лопаток компресора вертолїтного двигуна має місце значна кількість ерозійних пошкоджень, тому розробка способу захисту лопаток від зносу ерозійного шляхом нанесення плазмових покриттів є актуальним завданням.

Після УЗЗ на тонких кромках в окремих місцях з'являються задирки через перенаклеп, які необхідно усувати ручним поліруванням. Тому як альтернативний метод було застосовано пневмодробеструйне зміцнення (ПДЗ) [28], яке відрізняється ковзним зіткненням кульок з поверхневого пера лопатки.

Після комплексного зміцнення (ІПА+ПДЗ) рівень стискаючих залишкових напружень досягав 300 МПа на глибині 20-30 мкм. На базі 100 млн. циклів межа витривалості лопаток після комплексної обробки досягла 525 МПа, що дещо вище, ніж у серійних лопаток ($\sigma_{-1} = 500$ МПа).

У роботі [29] досліджено технологічні особливості магніто-абразивної обробки (МАО) пера лопатки при нанесенні покриттів TiN іонно-плазмовим методом. Встановлено, що чим нижче шорсткість вихідної поверхні, тим утворюється щільніше і дрібнозернисте покриття.

Показано можливість повторного нанесення TiN за схемою МАО+TiN+АО+TiN, що призводить до значного підвищення обмеженої межі витривалості. Застосування МАО підготовки поверхні лопаток під покриття TiN забезпечує високі адгезійні властивості.

У роботі [30] відзначається відсутність ознак альфування та інших структурних змін у зоні осадження покриття, отриманого ІПА. ІПА внаслідок

температурного фактора призводить практично до повної релаксації залишкових стискаючих напружень та утворення розтягуючих напружень в межах 24...26 МПа. Застосування деформаційного зміцнення (УЗЗ) іонно-плазмового покриття формує напруження, що стискає, до 210 МПа, що поширюється на глибину до 100 мкм.

В результаті комплексної обробки (ШПА + УЗЗ) межа витривалості лопаток I ступені компресора зі сплаву VT8M збільшується з 555 МПа (серійні лопатки без покриттів) до 588 МПа на базі 20 млн. циклів.

Результати досліджень щодо оптимізації режимів іонно-плазмового азотування представлено в роботі [31]. Показано, що у певних режимах спостерігається альфування поверхневого шару. Будучи α -стабілізатором, азот сприяє зміщенню фазової рівноваги у бік розчинення β -фази, а також дифундує вглиб металу по міжвузлях кристалічних решіток α та β -фаз. Також відзначається зниження вмісту алюмінію, що є α -стабілізатором.

Порівняльні випробування на втому показали, що найбільша межа витривалості лопаток I-й ступені компресора зі сплаву VT8M забезпечує режим ($T=550$ °C; $P=240$ МПа; $N_2 = 9\%$; $Av = 86\%$; $H_2 = 5\%$). У цьому мікротвердість поверхні збільшується з 408 до 559 МПа.

Механічні властивості та працездатність плазмових нітридтитанових покриттів на лопатках компресора значною мірою визначаються рівнем та характером залишкових напружень, які утворюються в покриттях у процесі їх нанесення [32, 33].

У роботі [33] визначені залишкові напруження у вакуум-плазмовому нітридтитановому покритті, що змінюється в діапазоні -780...-280 МПа залежно від товщини покриття. Показано, що зі збільшенням товщини покриття з 4 до 10,5 мкм рівень стискаючих залишкових напружень підвищується з 775 МПа до 2650 МПа.

У роботі [34] отримано розподіл залишкових напружень у лопатках, покритих нітридом титану TiN, при якому величина стискаючих залишкових напружень у поверхневому шарі склала 1400...1500 МПа, що у 3...5 разів вище, ніж у серійних лопаток.

Встановлено, що наявність покриття TiN призводить до підвищення опору втоми на 11%, ерозійної стійкості лопаток в 1,5...1,7 рази та збільшення мікротвердості пера лопатки з 400...430 МПа до 1000...1300 МПа.

Високий рівень залишкових напружень у PVD-покриттях обумовлений різницею температурних коефіцієнтів лінійного розширення матеріалів покриття та основи, наявністю захоплених атомів газу, неповним структурним упорядкуванням, а отже, значним ступенем дефективності конденсату [35].

У роботах [36] встановлено збільшення умовної межі плинності, межі міцності та одночасне спалювання пластичних характеристик при нанесенні вакуум-плазмових нітридтитанових покриттів. Так $\sigma_{0,2}$ збільшується з 537 до 690 МПа, σ_s 945 до 1050 МПа, δ та ψ знижуються з 57 до 46% та з 46% до 40% відповідно (товщина покриття TiN становила 6,5 мкм). Це визвано тим, що плівка має велику щільність і модуль пружності, рівний $E_n = 4,4 \cdot 10^5$ МПа і є додатковим бар'єром, що перешкоджає виходу дислокацій на поверхню. В результаті в приповерхневому шарі створюються загальмовані групи дислокацій, що призводить до виникнення залишкових напружень, що стискають. Діяльність зазначається, що вплив плівок на деформацію приповерхневих шарів залежить від сили зчеплення поверхонь плівки з основою.

У розглянутих роботах наголошується, що основний внесок у формування залишкових напружень у покриттях вносить текстура та термічна компонента, представлені основні закономірності нітридоутворення та формування залишкових напружень показано перерозподіл легуючих елементів у приповерхневому шарі.

Слід відмітити, що практично відсутні роботи з вивчення формування характеристик поверхневого шару з нітридтитановим покриттям методом КІБ, підданими обробно-зміцнювальної обробки.

1.3 Вплив характеристик поверхневого шару на опір втоми, ударну міцність та зносостійкість

Оздоблювально-зміцнюючі методи, що дозволяють формувати в приповерхневому шарі задані характеристики, значною мірою визначають

здатність лопаток компресора, що несе, (витривалість, ударну міцність і зносостійкість).

Фактори, що впливають на опір втоми лопаток компресора з комплексною обробкою, стосовно особливостей геометрії пера, технології виготовлення та пошкодження в експлуатації, можна умовно розбити на три групи.

До першої групи відносяться геометричні параметри кромки, співвідношення рівнів напружень на кромках і спинці лопатки, рівень концентрації напружень від слідів обробки.

До другої групи чинників слід зарахувати основні характеристики вихідної структури поверхневого шару. Стан поверхневого шару з урахуванням спадкового впливу попередньої обробки можна представити наступними параметрами: ступенем і глибиною наклепу, рівнем та глибиною залягання залишкових напружень, текстурою та структурно-фазовими змінами.

До третьої групи факторів, що безпосередньо впливають на формування характеристик поверхневого шару, опір втоми, ударну міцність і зносостійкість, відносяться методи деформаційного та комплексного зміцнення.

Велике значення має співвідношення деформованого шару та внутрішнього обсягу металу, оскільки це пов'язано з формуванням залишкового напруженого стану.

Складність прогнозування міцності матеріалів при циклічному навантаженні пов'язана з тим, що процес зародження та поширення тріщини втоми є локальним. А на опір втомному руйнуванню впливають багато факторів: високі локальні напруження в обсягах металу, порівнянних з розмірами його структурних складових, зумовлені рівнем зовнішніх навантажень, циклічність навантаження, стан поверхневого шару, концентрація напружень, масштабний фактор та інші [6].

Ефективність зміцнення лопаток компресора з титанових сплавів, мають тонкі кромки, значною мірою визначається вибором оптимального режиму. Дослідження витривалості [37] лопаток із сплаву VT8 показали, що для обробки УЗЗ слід застосовувати кульки діаметром 1,3 мм. Збільшення тривалості зміцнення з 5 до 10 хвилин викликає послаблення тонких кромки лопаток. При випробуваннях

на втому здебільшого зародження тріщини починається біля кромки. Зміцнення кульками діаметром 1,3 мм протягом 5 хв забезпечує рівномірність кромки та спинки лопаток.

У роботі [38] представлені результати випробувань на втому та ударну міцність лопаток III-й ступені КНД двигунів Д-36, остаточно оброблених ВП, УЗЗ та ПДЗ. УЗЗ та ПДЗ підвищують межу витривалості з 425 МПа (віброполіровані лопатки) до 450 МПа. Основний внесок у підвищення міцності лопаток вносять залишкові стискаючі напруження. Так застосування високотемпературного відпалу лопаток, оброблених УЗЗ, призвело до зниження σ_{-1} із 450 до 405 МПа.

У роботі показано, що зміцнююча обробка кульками пера лопаток різко знижує розсіювання довговічності за рахунок формування однорідних характеристик поверхневого шару: мікронерівностей, залишкових напружень та текстури.

Відомо, що опір ударним навантаженням лопаток КВТ значною мірою залежить стану поверхневого шару. У роботах [39, 40] представлені результати ударних випробувань лопаток газотурбінного двигуна за часткового моделювання умов зіткнення зі сторонніми предметами. Встановлено, що ультразвукове зміцнення кульками лопаток II-й ступені компресора зі сплаву ВТ8, виконане на оптимальному режимі ($\tau=5$ хв; діаметр кульок 1,3...1,6мм) дозволило значно підвищити їхню ударну міцність за рахунок впливу залишкових стискаючих напружень.

Питання ударної міцності лопаток III-й ступені КНД двигуна Д-36 розглянуті у роботі [41]. Показано, що ПДЗ підвищує “живучість” та ударну міцність лопаток на 54% та 13% відповідно порівняно з віброполіруванням. Середня кількість ударів до руйнування лопаток після ВП становить 2,8, після ПДЗ - 4,3.

У роботі [42] розглянуто вплив різних поєднань фінішних методів обробки на віброміцність лопаток III-й ступені компресора двигуна Д-36. Розглянуто такі методи зміцнення як ВП, УЗЗ та ПДЗ. Найбільше підвищення опору втому з $\sigma_{-1}=425$ МПа (ВП) забезпечують УЗЗ та ПДЗ ($\sigma_{-1}=450$ МПа). При цьому найменше

розсіювання довговічності лопаток спостерігається після обробки ПДЗ ($\bar{S}_{lgN} = 0,274\text{МПа}$), що підтверджується дослідженням вогнищ зародження втомних тріщин. Так для віброполірованих лопаток найбільш небезпечною є зона 6,5 ... 25 мм від підшви замка, після УЗУ з подальшим ручним поліруванням для видалення задирок зона збільшується від 8 до 60 мм, а після ПДЗ знаходиться в межах від 5 до 25 мм.

Питання впливу залишкових напружень на експлуатаційні показники не є однозначними. Мають значення і зміни, які протікають у поверхневому шарі деталі при додатку робочих напружень. За певних умов зовнішнього навантаження в поверхневому шарі деталі настає пластичний стан, що призводить до перерозподілу залишкових напружень. Тому важливе значення має позитивний вплив зміцнення збільшення опору мікропластичним деформаціям [43].

У роботі [44] досліджено вплив вакуум-плазмових покриттів TiN та інших на циклічну міцність титанових сплавів BT1-0 та BT20 при температурі 350...640 °C та частоті навантаження 10 кГц. Встановлено, що циклічна міцність матеріалів із покриттями підвищилася на 20...40% порівняно з циклічною міцністю матеріалів без покриттів. Зародження тріщини втомі при випробуваннях на втому зразків з покриттями відбувається під покриттям. Подальше підвищення циклічної міцності можливе за рахунок деформаційного попереднього покриття підшарової зони. Така комплексна зміцнююча обробка дає можливість значно підвищити параметри витривалості.

За результатами досліджень, наведених у роботі [45], деталі з нітридними покриттями (TiN), нанесені вакуум-плазмовим методом, добре зарекомендували себе під час роботи в умовах впливу ерозії та корозії. Випробування на втому показали, що вакуум-плазмові покриття дозволяють підвищити межу витривалості зразків із титанових сплавів на 10...15%.

Питання впливу комплексного зміцнення (іонно-плазмове азотування+УЗЗ) лопаток I-й ступ. компресора зі сплаву BT8M формування структури, залишкових напружень і опір втомі розглянуто у роботі [46]. Ультразвукове зміцнення

кульками провадилося до проведення іонно-плазмового азотування. Дослідження мікроструктури показало відсутність ознак альфування та інших структурних змін у зоні осадження покриття. Іонно-плазмове азотування за рахунок температурного фактору призвело до зменшення рівня стискаючих залишкових напружень, утворених УЗЗ, з 340 МПа до 24 МПа біля поверхні.

Показано, що комплексне зміцнення (УЗЗ+ІПА) призводить до підвищення σ_{-1} з 464 МПа (ВП+ІПА) до 563 МПа. Однак це значення межі витривалості нижче σ_{-1} лопаток, підданих іонно-плазмовому азоту після тонкого полірування (глянсування кромки).

Це свідчить, що наявність на вхідній та вихідній кромках лопаток (риски, вириви, сколи) значно знижують опір втоми лопаток.

У 1987 р. в районах Середньої Азії було проведено експлуатаційні випробування двигунів ТВЗ-117 з протиерозійним захистом лопаток нітридом титану TiN [46]. Робочі лопатки І-й ступені компресора мали знос від 0,3 до 0,5 мм по вхідній кромці, а також дрібні вибоїни на кориті та вхідній кромці по всій довжині лопаток від попадання великої кількості великих частинок піску.

Встановлено, що наявність покриття TiN на пері робочих лопаток компресора забезпечує при роботі двигуна в заповнених умовах захист профілю пера майже по всій площі (за винятком зношування вхідних кромки від прямого зіткнення з частинками піску, особливо в периферійній зоні лопаток).

Аналогічні результати були отримані у процесі експлуатаційної перевірки лопаток компресора, покритих нітридом титану TiN [47].

Встановлено, що межі витривалості лопаток компресора (σ_{-1} на базі 108 циклів) з покриттям TiN без покриття дорівнюють 330 і 310 МПа відповідно. Напрацювання в експлуатації лопаток, підданих випробуванням на втому, становило 500 годин.

Результати випробувань на втому [48] показали, що межі витривалості лопаток, виготовлених за серійною технологією та лопаток з покриттям з нітриду титану TiN, практично однакові і знаходяться на рівні $\sigma_{-1} = 470$ МПа.

Результати [49] стендових випробувань двигуна ТВ-117 із засипкою 23 кг кварцового піску (в заповнених умовах) показали, що робочі лопатки I-й ступені компресори мають зношування вхідної кромки і передньої частини корита пера по всій довжині у вигляді кратерів. При цьому 35...40% робочих лопаток IV...XII ступенів мають зношування верхньої частини тільки з боку вхідної кромки.

У висновках зазначається, що лопатки I-й ступені компресора, покриті TiN, мають сумарне (експлуатаційне і стендове) знос хорд нижче гранично-допустимого; серійні лопатки I-й ступені зношені вище гранично-допустимого розміру.

Слід зазначити, що в експлуатації лопатки першій ступені компресори схильні до ерозійного зносу по всій довжині, більш глибокі пошкодження мають місце у верхній частині пера.

Наявність покриття пера лопаток першій ступені компресора із сплаву VT8M, створеного методом іонно-плазмового азотування, завдяки якому підвищується ерозійна стійкість [50].

Дослідження ерозійної стійкості лопаток компресора двигуна ТВ-117 без покриттів та з покриттями TiN методом КІБ були проведені при стендових випробуваннях двигуна [51].

При проведенні досліджень використовувався штучний пилоподібний кварц марки КП-3 з розміром частинок до 50 мкм, який подавався двигун через спеціальний пристрій.

Встановлено, що покриття нітридом титану (TiN+CrN) підвищує ерозійну стійкість лопаток компресора в 10...12 разів.

У технічному звіті [52] наведено результати випробувань на втому лопаток I ступені компресора з покриттям TiN (КІБ), серійні та з імітацією експлуатаційних дефектів у вигляді вибоїн. Встановлено, що σ_{-1} лопаток з покриттям становить 500 МПа, що на 11% вище за величину межі витривалості лопаток без покриття.

Величина σ_{-1} лопаток з покриттям TiN та з нанесеними вибоїнами на 25...35 МПа вище, ніж на лопатках без покриття.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ
ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Опис об'єкта дослідження

Як об'єкт досліджень застосовували серійні лопатки I-й ступені компресора двигуна ТВЗ-117 і лопатки після експлуатаційного напрацювання – 960...2397 год.

За результатами досліджень [53] тривале експлуатаційне напрацювання суттєво змінює характеристики поверхневого шару лопаток компресора, що призводить до зниження опору втоми. Для підвищення несучої здатності необхідно застосувати ерозійностійкі дифузійні покриття.

Лопатки для випробувань підбирали у ВАТ “МОТОР СІЧ” згідно з вимогами, що пред'являються до лопаток при встановленні їх на двигун, що забезпечувало однорідність ознак та сприяло зменшенню розкиду експериментальних результатів.

Лопатки I-й ступені компресора (рис. 2.1) виготовлені з деформованого титанового сплаву ВТ8М, який замінив сплав ВТ8. Цей сплав відноситься до групи двофазових ($\alpha+\beta$) сплавів мартенситного класу.

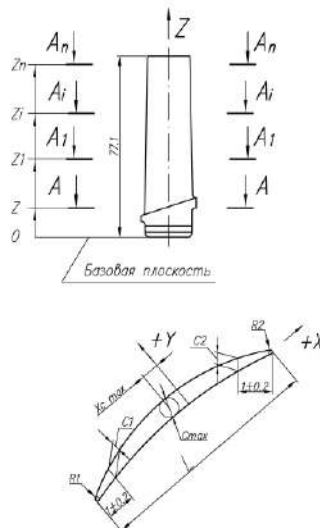


Рисунок 2.1 – Лопатка I ступ. компресора двигуна ТВЗ-117 (схема профілю)

На рис. 2.2. показано зміну геометричних параметрів лопатки за довжиною.

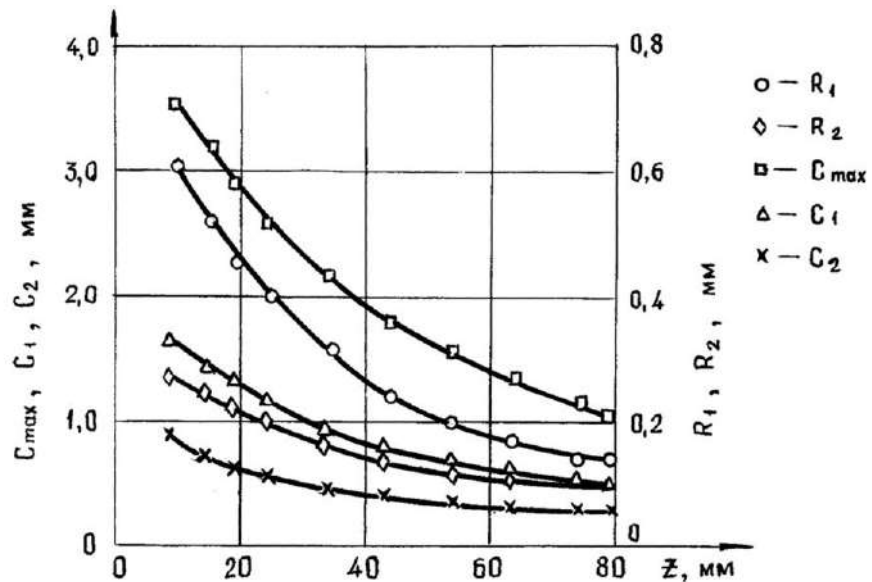


Рисунок 2.2 – Зміна геометричних параметрів пера лопатки за довжиною

Характерною особливістю лопаток компресора є наявність тонких кромок. Радіуси округлення кромки R₁ і R₂ за довжиною змінюються від 0,608 до 0,120 та від 0,128 до 0,1 мм, максимальна товщина C_{max} – від 0,35 до 1,05 мм відповідно. На відстані 1 мм від краю кромки товщина лопатки C₁ та C₂ знаходиться в межах 0,795...1,2 та 0,774...0,27 мм відповідно.

Твердість пера лопатки HRCe 32...38,5. Група контролю 4 за ОСТ1 00021-78.

2.2 Методи оздоблювально-зміцнювальної та комплексної обробки пера лопатки

2.2.1 Деформаційне зміцнення кульками в ультразвуковому полі

Процес при якому відбувається ультразвукове зміцнення деталей дуже складної геометричної форми заснований на передачі кінетичної енергії робочого тіла, яке відбувається за допомогою ультразвукового поля, що виникає в концентраторі при використанні двигуна, який генерує ультразвукові частоти для ініціювання пружних механічних коливань. Ультразвукове зміцнення відбувається за допомогою кульок, лопаток компресорів у виробництві проводять у спеціальних концентраторах, розроблених інженером Стебельковим І.А. [1, 54]. Лопатки та

зразки встановлюються в концентраторі у спеціальних пристосуваннях (рис. 2.3, 2.4).

Як робочі тіла використовуються сталеві кульки з матеріалу ШХ15 або нержавіючої сталі діаметром 0,4...3 мм.

УЗЗ пера лопаток виконувалося після віброполірування. Віброполірування проводиться у вібраційному контейнері серійної технології.

Слід зазначити, що після ультразвукового зміцнення в результаті перенаклепу при зіткненні кульок з тонкими кромками лопаток на них утворюються задирки, для усунення яких застосовується ручне полірування. Ручне полірування кромки значно збільшує трудомісткість виготовлення лопаток, призводить до перерозподілу залишкових напружень та створення на кромках поперечних рисок – технологічних концентраторів напружень. Це призводить до деякого зниження ефективності ультразвукового зміцнення.



Рисунок 2.3 – Диск з лопатками

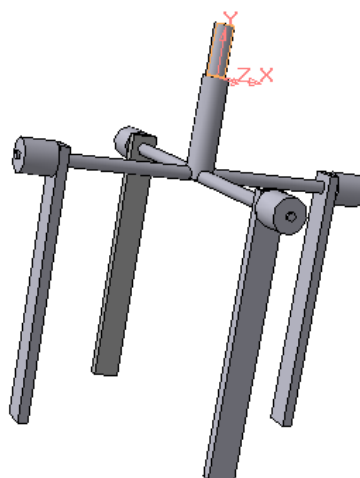


Рисунок 2.4 – Пристосування з зразками

2.2.2 Іонно-плазмове нанесення покриттів методом КІБ

Сутність даного методу полягає в електродуговому розпиленні металу у вакуумі, в середовищі реакційного газу, з подальшою конденсацією високошвидкісних потоків ($1 \cdot 10^3$ м/с) газометалевої плазми на оброблювану поверхню деталі.

Даний метод дозволяє розпорошувати будь-який струмопровідний матеріал, у тому числі титан, вольфрам, хром, молібден та ін., можна отримати нітриди та карбіди відповідних металів.

Високий ступінь іонізації плазмових потоків сприяє утворенню тугоплавких сполук при порівняно низькій температурі (300...600 °С) оброблюваної поверхні деталі, що дозволяє наносити покриття на різні матеріали, не змінюючи їх початкові фізико-хімічні властивості.

Нітрид-титанові покриття наносили методом конденсації при яких проходило іонне бомбардування поверхні (метод КІБ) на установці типу «Булат».

Комплексна обробка полягає в спільному ультразвуковому зміцненні, що передує КІБ, і подальшому нанесенні нітридного покриття.

2.3 Методика та обладнання для випробувань на втому лопаток.

Випробування на втому лопаток на електродинамічному вібростенді ВЕДС-200.

В експлуатації напруження в лопатках по першій згинальній формі значно вище, ніж за іншими формами коливань.

Відомо, що напруження за крутильною формою коливань із частотою $f=2000 \dots 2100$ Гц дорівнюють $\sigma_{\max} = \pm 22$ МПа, за другою згинальною формою коливань із частотою $f=2500 \dots 2860$ Гц – $\sigma_{\max} = \pm 1,5$ МПа, за високочастотною формою коливань із частотою $f=8000 \dots 9350$ Гц – $\sigma_{\max} = \pm 44$ МПа.

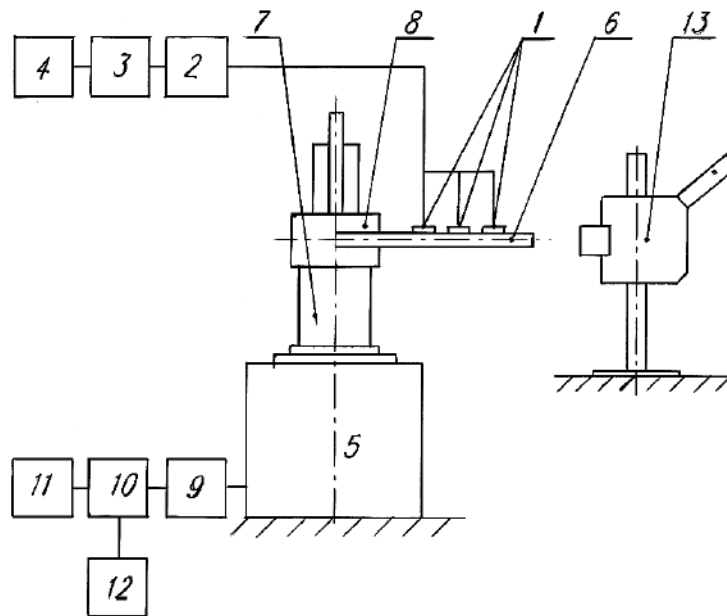


Рисунок 2.5 – Встановлення для дослідження ПДВ лопатки

- | | |
|--------------------------|-------------------------------|
| 1 – тензодатчики; | 8 – захоплення пристосування; |
| 2 – комутатор; | 9 – кінцевий підсилювач; |
| 3 – тензодатчик; | 10 – підсилювач; |
| 4 – мілівольтметр В7-27; | 11 – генератор; |
| 5 – вібростенд ВЗДС-200; | 12 – частотомір ЧЗ-32; |
| 6 – лопатка; | 13 – мікроскоп |
| 7 – стійка; | |

У дипломній роботі лопатки випробовували на втому стандартним методом та прискореним методом “сходів”.

Для отримання достовірних даних методом “сходів” необхідно 12...20 лопаток, що дозволяє отримати достовірні результати щодо середнього значення межі витривалості та його розсіювання на базі $N = 2 \cdot 10^7$ циклів.

Даний метод застосовують для оцінки впливу методів обробки на втомну витривалість при яких відбувається скорочення тривалості та вартості випробувань. При проведенні випробувань збільшення величини напруження становило 20 МПа.

Розрахунок межі витривалості (середнє значення) для ймовірності руйнування 50% робили по зруйнованим (σ_{-1}^p) лопаткам.

$$\bar{\sigma} = \sigma_0 + \Delta\sigma \left(\frac{A}{N} - \frac{1}{2} \right), \quad (2.1)$$

де σ_0 - Найменше значення напруження при випробуваннях;

$$A = \sum_{i=1}^n i \cdot r_i ; i=0, 1, 2...n; n - \text{порядковий номер навантаження};$$

r_i - число подій

$$N = \sum_{i=0}^n r_i - \text{загальна кількість однакових подій};$$

Випробування лопаток проводилося при постійній частоті коливань до того моменту, поки не з'являться макротріщини довжиною 1...3 мм, що відповідало падінню частоти своїх коливань на 2...3 %.

Частота своїх коливань лопаток I-й ступені компресора зі сплаву ВТ8М по першій згинальній формі становить $f = 620 \dots 640$ Гц.

Момент руйнування, фіксували зниженням частоти власних коливань.

Для калібрування ми використали контрольну тарірувальну балку, яку прикріпили замість досліджуваної лопатки. На відстані від місця затискання балки один за одним наклеювалися по ширині датчики. Переміщення балки було здійснено вібратором від двигуна у резонансному режимі. Вимір подвоєної амплітуди ми проводили за допомогою МБС-1, що застосовується для контролю переміщення пера лопатки.

За показаннями приладів, до яких підключені тензодатчики отримували по три значення напружень для кожної величини амплітуди, що задається (табл. 2.1) і обчислювали їх середню величину за формулою (2.2).

Таблиця 2.1 – Результати тарування тензодатчиків на камертонній балці

№ тензодатчика	1	2	3
№ виміру	U1, В	U2, В	U3, В
1	0,133	0,134	0,136
2	0,134	0,135	0,135
3	0,134	0,134	0,136

$$\bar{U} = \frac{\bar{U}_1 + \bar{U}_2 + \bar{U}_3}{3} = 0,13455 \quad (2.2)$$

Розмір ступеня деформації балки у досліджуваному перерізі дорівнює $E=6,6 \cdot 10^4$. Динамічний модуль пружності матеріалу лопаток із сплаву ВТ8М- $E_d=12,75 \cdot 10^4$ МПа. Механічна напруження в зоні наклейки датчиків:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E_g = 6,6 \cdot 10^{-4} \cdot 12,7 \cdot 10^4 = 84,15 \text{ МПа.} \quad (2.3)$$

Коефіцієнт зв'язку між механічним та електричним напруженням:

$$K = \frac{\sigma}{U} = \frac{84,15}{0,13455} = 625,42 \frac{\text{МПа}}{\text{В}} \quad (2.4)$$

Для проведення випробувань необхідно отримати залежність напруження, що задається, від амплітуди коливань лопатки (σ_{-2A}) за допомогою тензометрування. На натурні серійні лопатки з наступним напиленням нітридом титану TiN (шифри – ВП-1, ВП-2, ВП-3, ВП-4) були наклеєні тензодатчики та підключені до тензометричного підсилювача, який з'єднаний з цифровим вольтметром.

При тензометруванні амплітуда коливань лопаток вибиралася такою, щоб напруження в досліджуваному місці становили трохи більше 450 МПа. Для побудови графічної залежності σ_{-2A} після встановлення амплітуди знімали показання вольтметра, які потім переводили у напруження за даними калібрування датчиків $\sigma_i = U_i \frac{\sigma}{U}$ (Табл. 2.2)

Середнє значення $\frac{\sigma}{2A} = 52,0 \frac{\text{МПа}}{\text{мм}}$, тобто при подвійній амплітуді, що дорівнює 10 мм, напруження в небезпечному перерізі на спинці лопатки становить 520 МПа.

Одним з важливих параметрів витривалості, що характеризують рівень довговічності при напруженнях вище за межу витривалості, є коефіцієнт живучості. Живість характеризується відносною кількістю циклів до руйнування. За результатами випробувань лопаток на втому було розраховано коефіцієнт живучості K_i ; за наступною формулою:

$$K_i = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i \cdot N_i}{n \cdot N_6 \sigma_{-1}^p}, \quad (2.5)$$

де σ_i , N_i – напруження та число циклів до руйнування лопаток при випробуванні на втому;

n - число лопаток, випробуваних при рівнях напружень, що перевищують розраховане значення межі витривалості (σ_{-1}^p);

N_6 - Базова кількість циклів при випробуванні лопаток на втому ($2 \cdot 10^7$ цикл)

Таблиця 2.2– Результати тензометрування лопаток

Спосіб обробки	2A, мм	U, В	σ , МПа	$\sigma/2A$, МПа/мм
ВП-1	1	0,08	0,49	49,7
	2	0,16	103,1	51,9
	3	0,25	156,3	52,1
ВП-2	3	0,24	155	51,9
	4	0,33	208	52,1
	5	0,42	264	52,8
ВП-3	3	0,25	154	51,5
	4	0,33	208	52,1
	5	0,42	262	52,4
ВП-4	3	0,25	154	51,5
	4	0,35	216	54
	5	0,42	263	52,8

2.4 Методика випробувань лопаток на ударну міцність

Лопатки компресора не мають різких конструктивних концентраторів напружень і при ударних випробуваннях, а також при зіткненні їх з сторонніми тілами, велика частина роботи витрачається на пластичне деформування та утворення тріщини з подальшим руйнуванням.

У цій роботі при випробуванні на опір удару лопаток перший ступені компресора було фіксовано пластичну деформацію та кількість ударів до руйнування або появи тріщини, та подальшого руйнування. Для цих ударних випробувань ми використовували спеціальний копер. Випробувана лопатка встановлювалася у тому замку, як й у випробувань на втому. Замок із лопаткою кріпили у пристосуванні з фіксованим зусиллям. Повторні удари наносилися бойком (вантаж масою 4 кг), закріпленим на маятнику і профіль корита лопатки, що має на торці (рис. 2.6). Масу вантажу було підібрано експериментально з розрахунку руйнування лопатки при повторних ударах в одному перерізі та досягненні максимального кута вигину (рівень накопичення пластичної деформації). Удар наносився з боку корита центральною частиною пера лопатки без пошкодження кромки.

Для визначення найбільш небезпечної точки застосування навантаження були проведені порівняльні випробування серійних лопаток у трьох перерізах (табл. 2.3).

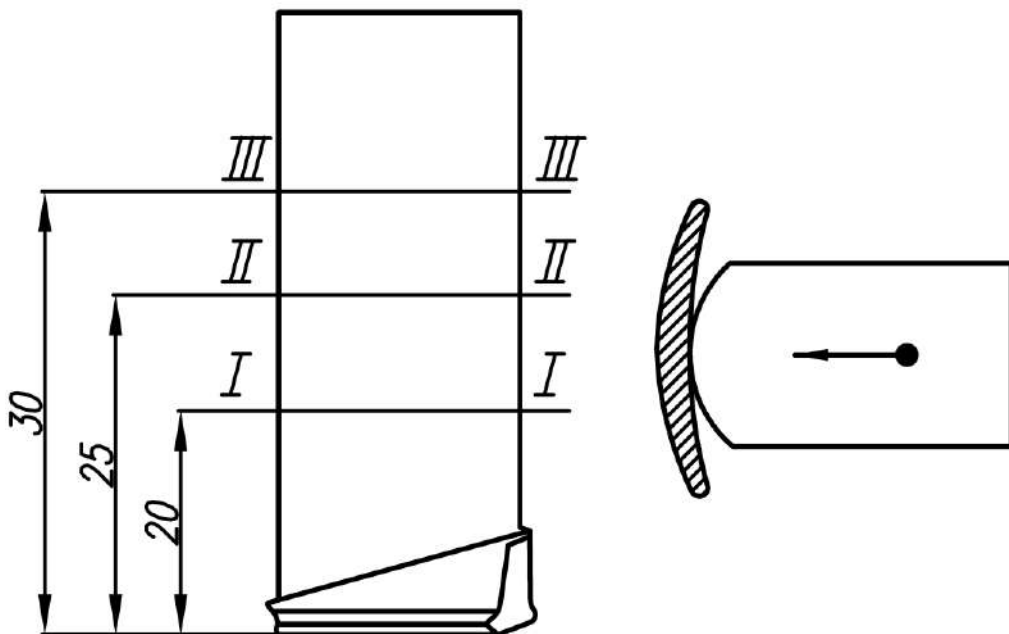


Рисунок 2.6 – Схема лопатки та форма вантажу

Таблиця 2.3 – Результати ударних випробувань лопаток

Відстань від підосви замка, мм	Послідовність ударів	Кут вигину, град.	Примітка
1	2	3	4
20	1	5	
	2	7,5	
	3	10	
	4	13,5	
	5	-	злам
20	1	6,5	
	2	16,5	
	3	-	злам
20	1	6	
	2	9	
	3	-	злам

Кінець таблиці 2.3

1	2	3	4
25	1	9	
	2	12	
	3	15	
	4	-	тріщина
25	1	7,5	
	2	10	
	3	-	тріщина
25	1	6,5	
	2	11	
	3	15	
	4	19	
	5	-	злам
30	1	10	
	2	18	
	3	26,5	
	4	35	
	5	-	тріщина
30	1	12	
	2	21	
	3	30	
	4	-	заклинювання
30	1	10	
	2	18	
	3	27	
	4	32,5	
	5	-	заклинювання

При випробуванні трьох лопаток ударами в 1-му та 2-му переріз лопатки руйнувалися після 2-4 ударів. При випробуванні в 3-му перерізі, розташованому на відстані 30 мм від підшви замка, лопатки не руйнувалися і відбувалося заклинювання лопатки з бойком після 4 ударів.

Таким чином, було встановлено, що найбільш небезпечний переріз лопатки при зіткненні з стороннім тілом знаходиться на відстані 20...25 мм від підшви замка. Доцільно проводити випробування у двох перерізах: 20 та 30 мм від підшви хвостовика для визначення кількості ударів до руйнування лопатки та рівня накопиченої пластичної деформації.

При випробуваннях після кожного удару фіксували накопичену величину пластичної деформації при згинанні лопатки з точністю до $\pm 0,5^\circ$. Випробування лопаток припиняли при заклинюванні бойка з лопаткою або її руйнуванні, після появи тріщини.

2.5 Дослідження залишкового напруженого стану поверхневого шару лопаток

2.5.1 Методика визначення залишкових напружень та параметрів наклепу

Залишкові напруження визначали механічним методом. Вимірювання проводилось прогином консольно закріпленого зразка, який вирізали з лопатки електроерозійним методом при якому послідовно знімали шарі металу електролітичним поліруванням на приладі ПІОН-2. Для визначення знаку та характеру розподілу залишкових напружень на поверхні лопаток після різних операцій обробно-зміцнювальної обробки та іонно-плазмового напилення досліджували зразки, вирізані з боку вхідної кромки та на відстані 5 мм від вихідної кромки (приблизно посередині пера) розміром 50×8 мм (рис. 2.7).

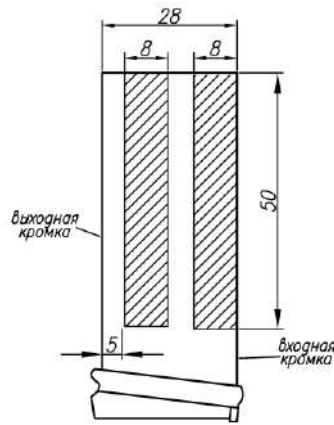


Рисунок 2.7 – Схема вирізки зразків із пера лопатки

Розрахунок величини залишкових напружень був проведений за формулою (2.6) згідно з рекомендаціями роботи [68]

$$\sigma_1 = \sigma_1 + \sigma_2 \quad (2.6)$$

де σ_1 – напруження, виміряні при послідовному видаленні досліджуваного шару; σ_2 – напруження, що виникають при пружній деформації зразка від зняття пластично деформованих шарів. У формулі (2.6) величину напруження, що виникають при вирізанні зразка, не враховували.

Значення напруження σ_1 визначали за формулою (2.7)

$$\sigma_1 = \frac{E \cdot (h-a)^2}{3 \cdot L^2} \cdot \frac{df}{da} \quad (2.7)$$

де $E=1,2 \cdot 10^5$ – статичний модуль пружності матеріалу, МПа;

h – висота, мм;

a – глибина віддаленого шару, мм;

L – довжина, мм;

$\frac{df}{da}$ – значення похідної функції прогину на глибині a .

Значення додаткових напружень σ_2 визначали за формулою (2.8)

$$\sigma_2 = \frac{E}{3 \cdot L^2} \cdot [4(h-a) \cdot f(a) - 2 \cdot \int_0^a f(\xi) d(\xi)], \quad (2.8)$$

де $f(\xi)$ – Функція прогину зразка, мм.

Для оцінки впливу режимів КІБ та комплексної обробки на напружений стан лопаток також визначали залишкові напруження кривизною напиленого прямокутного зразка. При напиленні покриття на зразок невеликої товщини, з одного боку, відбувається його деформація.

Вимірюючи придбаний таким чином прогин або радіус кривизни зразка з основного матеріалу, можна визначити $\sigma_{ост}$ за відомими формулами [57]. З використанням рівняння пружної лінії для балки в роботі отримана залежність для залишкових напружень:

$$\sigma_{ост} = \frac{4EH^3}{3a^2(1-\mu)(H+h)} \frac{f}{h}, \quad (2.9)$$

де E , μ – модуль пружності та коефіцієнт Пуассона матеріалу основи; a – довжина зразка; f – стріла прогину; H , h – товщина відповідно основи та покриття.

Для тонких покриттів ($h \ll H$) формула (1) може бути записана у вигляді [100]

$$\sigma_{ост} = \frac{4EH^2}{3a^2(1-\mu)} \frac{f}{h}, \quad (2.10)$$

а для лінійного напруженого стану –

$$\sigma_{ост} = \frac{4EH^2}{3a^2} \frac{f}{h}. \quad (2.11)$$

Використання методів розрахунку тонких пластин на вигин дозволило авторам [57] отримати наступну розрахункову формулу:

$$\sigma_{ост} = \frac{4EH^3}{6(1-\mu^2)(H+h)Rh}, \quad (2.12)$$

R - радіус кривизни, набутий зразком в результаті деформації, викликаної залишковими напруженнями.

В умовах лінійного напруженого стану при $h \ll H$ залежність (2.12) перетворюється на відому формулу Стонея:

$$\sigma_{ост} = \frac{EH^2}{6Rh}. \quad (2.13)$$

Оцінку ступеня наклепу пера лопаток проводили після різних методів обробки. Мікротвердість поверхні визначали на приладі ПМТ-3 з навантаженням на алмазну піраміду 50 Г, ступінь наклепу розраховували за формулою (2.14):

$$H = \frac{H_{\mu}^n - H_{\mu}^э}{H_{\mu}^э} \cdot 100\% \quad (2.14)$$

де H_{μ}^n - мікротвердість поверхні досліджуваного зразка, МПа;

$H_{\mu}^э$ - мікротвердість поверхні зразка (еталона), МПа.

Як зразки (еталони) використовували шліфи з полірованою поверхнею, виготовлені з серцевини лопаток. Значення H_{μ} визначали по 10 відбиткам, що мають правильну форму.

2.6 Методика дослідження адгезійної міцності покриттів методом КІБ

Визначення міцності зчеплення (адгезійної міцності) покриття з досліджуваним матеріалом проводилися на плоских зразках розміром $3 \times 8 \times 80$.

Зразки виготовлялися за технологією, що відповідає лопатки з напиленням.

Випробування зразків з нітридтитановим покриттям на адгезійну міцність проводили за допомогою ступінчастого валу, встановленого в центрах токарного верстата (рис. 2.8, а). Діаметри сходів валу змінювалися від 150 до 43 мм.

У верхній частині валу був знятий шар металу на 20 мм вище осьової лінії (рис. 2.9). Досліджуваний зразок (рис. 2.10) притискали нижнім кінцем до поверхні

сходинки валу з найбільшим діаметром і робили вигин (обтискання) за допомогою оправлення.



а



б

Рисунок 2.8 – Ступінчастий вал:

а – із затисненим зразком, б – із вигнутим зразком

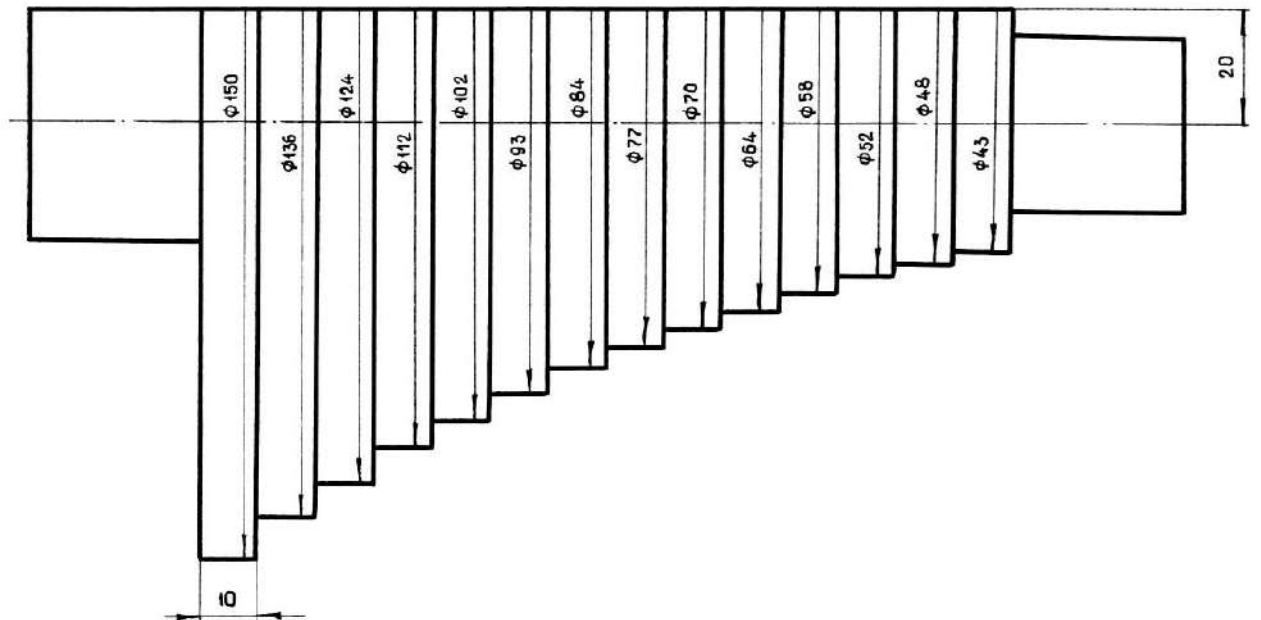


Рисунок 2.9 – Ступінчастий вал

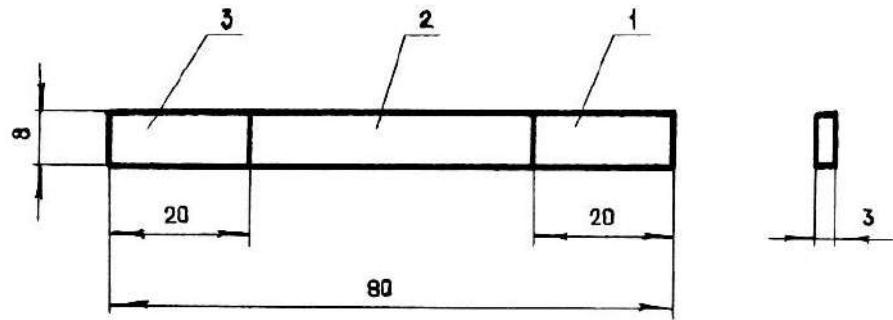


Рисунок 2.10 – Зразок з нітридтитановим покриттям:

1 – ділянка затиску, 2 – досліджувана ділянка, 3 – ділянка для вигину

Потім на мікроскопі МБС-9 (збільшення $\times 16,7$) визначали появу мікротерещин у покритті. За відсутності мікротріщини проводили обтискання по наступній сходинці валу з меншим діаметром. При появі мікротерещин на поверхні зразка з нітридтитановим покриттям випробування припиняли (рис. 2.8) та розраховували рівень стискаючих напружень.

Адгезійну міцність зразків оцінювали за значеннями стискаючих напружень, при яких відбувається розтріскування покриттів.

2.7 Послідовність виконання експериментів

Головним критерієм оцінки несучої здатності лопаток компресора є опір втоми. Основні фактори: режими комплексного зміцнення, наявність технологічних концентраторів напружень, використання конкуруючих методів обробки.

Очевидно, що проведення повного експерименту з перебором всіх параметрів становить великі труднощі у зв'язку з використанням дорогих натурних деталей (лопаток). Доцільно застосувати більш простий варіант плану проведення випробувань, при якому спочатку досліджують формування характеристик поверхневого шару, а потім опір втоми, зносостійкості та ударним навантаженням при варіюванні фінішними методами обробки та режимами.

Таким чином, з урахуванням раціонального використання дорогих лопаток представлена наступна послідовність виконання експериментів.

I етап: дослідження впливу методів та режимів комплексної обробки на формування шорсткості, параметрів наклепу, залишкового напруженого стану поверхневого шару та на адгезійну міцність покриття.

II етап: визначення опору втоми та ударної міцності лопаток, оброблених різними комплексними оздоблювально-зміцнювальними методами.

III етап: визначення раціонального варіанта комплексної обробки, його дослідна перевірка на опір зношування та розробка технологічних рекомендацій.

Така послідовність виконання експериментальних робіт при скороченні кількості партій натурних лопаток та застосуванні обмежених баз випробувань на втому є раціональною і одночасно забезпечує отримання достовірних результатів.

2.8 Висновки

1. Розроблено системний підхід до дослідження характеристик поверхневого шару натурних лопаток компресора з титанових сплавів у взаємному зв'язку з параметрами витривалості та ударної міцності, що дозволяє достовірно оцінити ефективність комплексного зміцнення.

2. Виконано дослідження залишкових напружень, при різних поєднаннях фінішної обробки із застосуванням комплексного зміцнення, які дозволяють цілеспрямовано сформулювати режими поверхневого шару та збільшити несучу здатність лопаток компресора.

РОЗДІЛ 3

ВЛИВ СПОСОБІВ ОБРОБКИ НА ПОВЕРХНЕВИЙ ШАР ЛОПАТОК КОМПРЕСОРА

3.1 Оцінка шорсткості поверхні лопаток

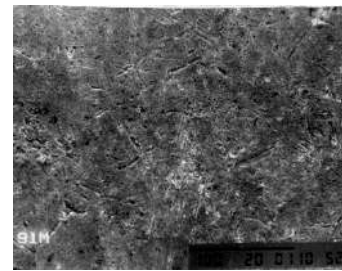
Величина шорсткості і характер мікрорельєфу є однією з основних характеристик поверхневого шару, що надають значний вплив на рівень технологічної концентрації напружень на пері лопаток компресора (спинка, корито, вхідна та вихідна кромки).

Окремі ризики, особливо поперечні ризики на тонких кромках лопаток, можуть бути місцем зародження втомних тріщин.

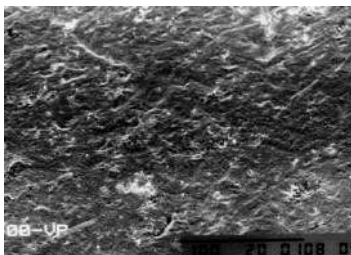
На рис. 3.1 показаний мікрорельєф пера лопаток після оздоблювально-зміцнювальної та комплексної обробки.



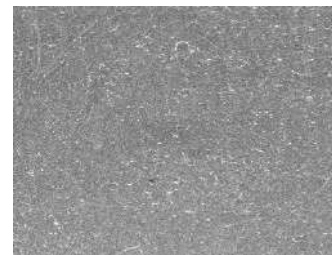
а



б



в



г

Рисунок 3.1 – Мікрорельєф пера лопатки після: а – ВП; б - ВП + УЗУ; в – напрацювання 1547 год. без ВП; г – нанесення покриття TiN

Лопатки після напрацювання в експлуатації (рис. 3.1 в) піддавалися операції очищення від нагару, рельєф поверхні мав сліди електрохімічного травлення. У згладжених кратерах спостерігалися впроваджені пилоподібні частинки.

Після ультразвукового зміцнення (рис. 3.1 б) практично відсутні ризики, які мають місце після ВП (рис. 3.1, а).

Профілограми та параметри шорсткості поверхні, визначені за допомогою пертометра Pertometer M3 і представлені на рис. 3.2 та в табл. 3.1 показали, що найбільш сприятливий мікрорельєф та низькі значення параметра шорсткості Ra були отримані на лопатках, підданих ультразвуковому зміцненню з подальшим напилюванням TiN. Значення Ra знизилося з 0,37 до 0,22...0,28 мкм. Застосування ультразвукового зміцнення покриття призвело до незначного підвищення Ra з 0,37 мкм (ВП) до 0,44 – ВП+КІБ+УЗЗ (10 хв).

Характерно, що напрацювання в експлуатації (1547 год.) супроводжувалося погіршенням мікрорельєфу та збільшенням Ra до 0,59 мкм.

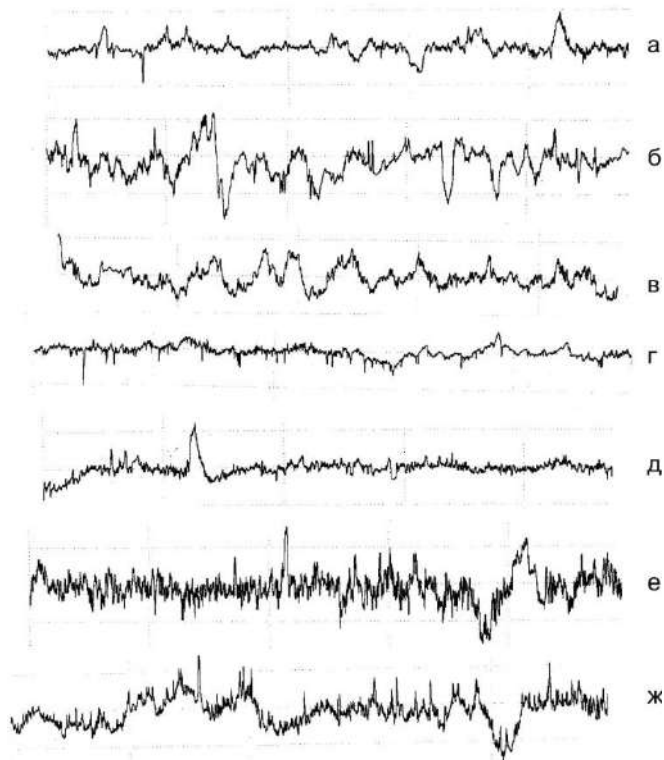


Рисунок 3.2 – Профілограми поверхонь пера лопаток після: а – ВП; б - без ВП (Н. 1547 год.); в – ВП+КІБ; г - ВП + УЗУ (5 хв) + КІБ (Н 1839); д - ВП + УЗЗ (10 хв) + КІБ; е - ВП + КІБ + УЗУ (5 хв); ж – ВП+КІБ+УЗУ (10 хв)

Таблиця 3.1 – Параметри шорсткості пера лопаток

Найменування параметру, мкм	ВП	Без ВП, Н. 1547	ВП+КІ Б	Н 1839 год, ВП + УЗУ (5хв) +КІБ	ВП, УЗУ (5хв)+ КІБ	ВП, УЗЗ (10 хв) + КІБ	ВП+КІ Б+УЗУ (5 хв)	ВП+КІ Б+УЗУ (10 хв)
Ra	0,37	0,59	0,34	0,22	0,27	0,28	0,38	0,44

3.2 Дослідження мікротвердості поверхні пера лопаток технологічними методами

Мікротвердість поверхні пера лопаток, оброблених різними методами, визначали на зразках, вирізаних із кромки та серединної частини спинки (рис. 3.3). Мікротвердість серцевини визначали на шліфах. Результати досліджень представлені у табл. 3.2 та показані на рис. 3.4...3.11.

Ультразвукове зміцнення (табл. 3.2) призводить до підвищення ступеня наклепу з 9% (ВП) до 19-20%.

Після напрацювання спостерігається незначне зниження мікротвердості, ступінь наклепу сягає 7%.

Значним підвищенням мікротвердості супроводжується нанесення покриття TiN після ВП та УЗЗ – ступінь наклепу збільшується до 101 та 109% відповідно.

При цьому ультразвукове зміцнення покриття призводить до зниження мікротвердості та ступеня наклепу до 84...93%, що, ймовірно, пояснюється деяким зміцненням покриття.

Розгляд зміни мікротвердості на спинці та кромках, а також по довжині лопатки показав відсутність будь-яких закономірностей (рис. 3.4...3.11). Найбільше розсіювання значень мікротвердості має місце після віброполірування (рис. 3.4). Відмінності значень мікротвердості на різних ділянках лопатки викликано розсіюванням при вимірюванні зразків із криволінійною залежністю.

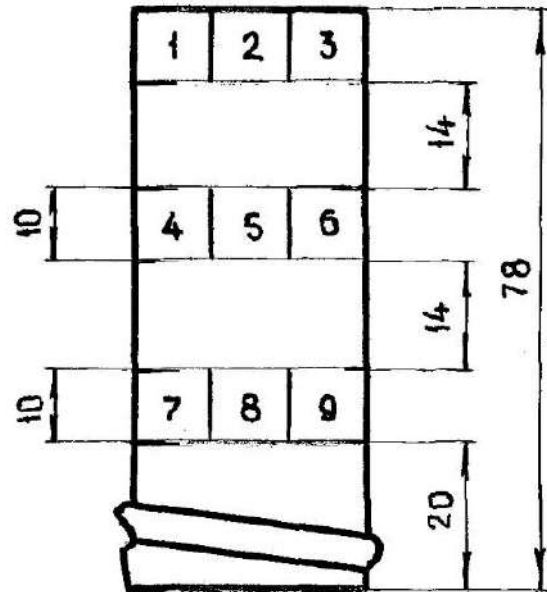


Рисунок 3.3 - Схема вирізки зразків із лопатки

Таблиця 3.2 – Результати досліджень мікротвердості поверхні пера лопаток

Метод обробки пера лопаток	Номер ділянки	$H_{\mu}^{нов}$, МПа	$H_{\mu}^{сер.}$, МПа	Ступінь наклепу Н, %	\bar{H} , %
1	2	3	4	5	6
Віброполірування	7к	4110	3800	8	9
	4к	4395		16	
	1 к	3950		4	
	8с	4090		8	
	5с	4230		11	
	2с	4120		8	
	9к	3950		4	
	6к	4260		12	
	3к	4130		9	

Продовження таблиці 3.2

1	2	3	4	5	6
Ультразвукове зміцнення (5 хв)	7к	4410	3840	15	19
	4к	4590		20	
	1 к	4650		21	
	8с	4670		22	
	5с	4700		22	
	2с	4510		17	
	9к	4570		19	
	6к	4490		17	
	3к	4400		15	
Напрацювання 1547 год. без віброполірування	7к	4110	3810	8	7
	4к	4000		5	
	1 к	4210		10	
	8с	4210		10	
	5с	4110		8	
	2с	4110		8	
	9к	4010		5	
	6к	4220		11	
	3к	3890		2	

Продовження таблиці 3.2

1	2	3	4	5	6
Ультразвукове зміцнення (10 хв)	7к	4590	3800	21	20
	4к	4560		20	
	1 к	4490		18	
	8с	4500		18	
	5с	4700		24	
	2с	4670		23	
	9к	4350		15	
	6к	4630		22	
	3к	4370		15	
Віброполірування + КІБ	7к	7700	3850	100	101
	4к	7680		99	
	1 к	7710		100	
	8с	7950		106	
	5с	7900		105	
	2с	7710		100	
	9к	7300		90	
	6к	7750		101	
	3к	7920		106	

1	2	3	4	5	6
Ультразвукове зміцнення (5 хв) + КІБ	7к	7750	3880	100	109
	4к	8050		107	
	1 к	8350		115	
	8с	8040		107	
	5с	8400		116	
	2с	7850		102	
	9к	8250		113	
	6к	7810		101	
	3к	8210		119	
КІБ + ультразвукове зміцнення (5 хв)	7к	7500	3850	95	93
	4к	7260		88	
	1 к	7450		94	
	8с	7820		103	
	5с	7440		93	
	2с	7600		97	
	9к	7300		90	
	6к	7190		87	
	3к	7280		89	
КІБ + ультразвукове зміцнення (10 хв)	7к	7190	3900	84	84
	4к	6850		76	
	1 к	7250		86	
	8с	6980		79	
	5с	7480		92	
	2с	7420		90	
	9к	7310		87	
	6к	7220		85	
	3к	6980		79	

Примітка: 7к, 4к, 1к - зразки з вихідної кромки;
8с, 5с, 2с – зразки із середини лопатки;
9к, 6к, 3к – зразки із вхідної кромки;

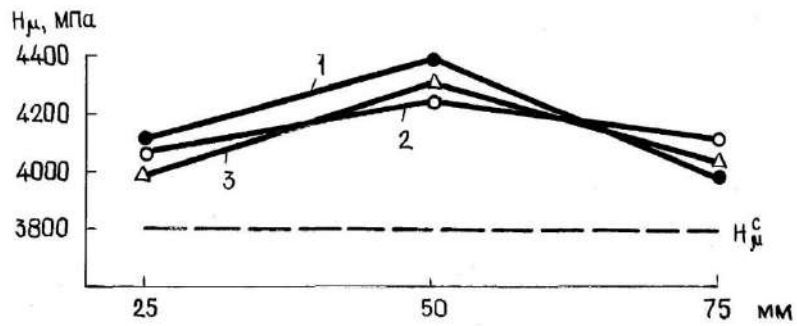


Рисунок 3.4 – Зміна мікротвердості поверхні за довжиною лопатки після ВП

1 – спинка; 2 – вхідна кромка; 3 – вихідна кромка

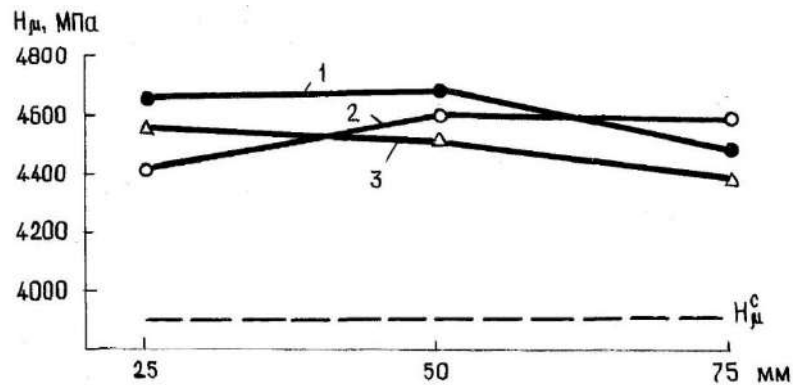


Рисунок 3.5 – Зміна мікротвердості поверхні за довжиною лопатки після

УЗЗ (5 хв)

1 – спинка; 2 – вхідна кромка; 3 – вихідна кромка

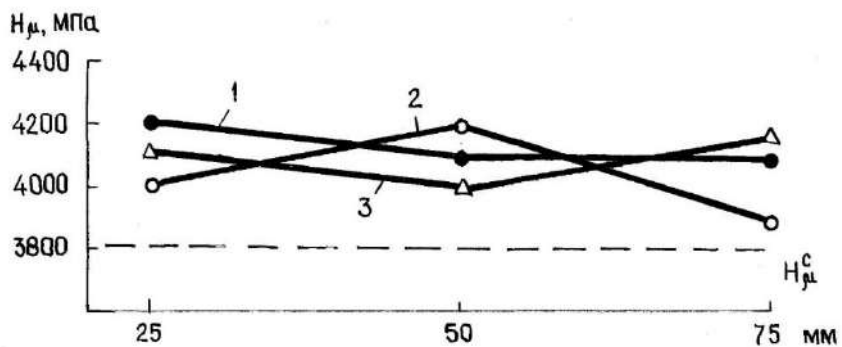


Рисунок 3.6 – Зміна мікротвердості поверхні за довжиною лопатки після

напрацювання 1547г. без ВП

1 – спинка; 2 – вхідна кромка; 3 – вихід кромка

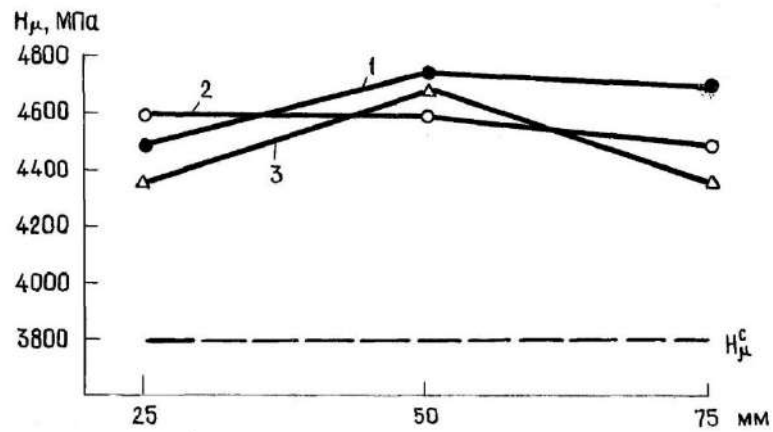


Рисунок 3.7 – Зміна мікротвердості поверхні за довжиною лопатки після УЗЗ (10 хв)

1 – спинка; 2 – вхідна кромка; 3 – вихідна кромка

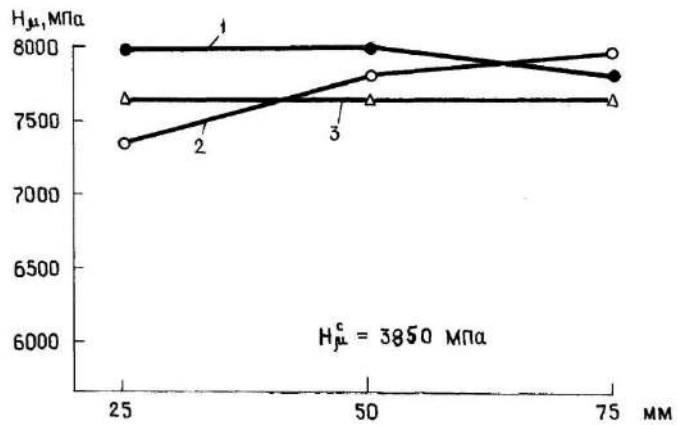


Рисунок 3.8 – Зміна мікротвердості поверхні за довжиною лопатки після ВП + КІБ

1 – спинка; 2 – вхідна кромка; 3 – вихідна кромка

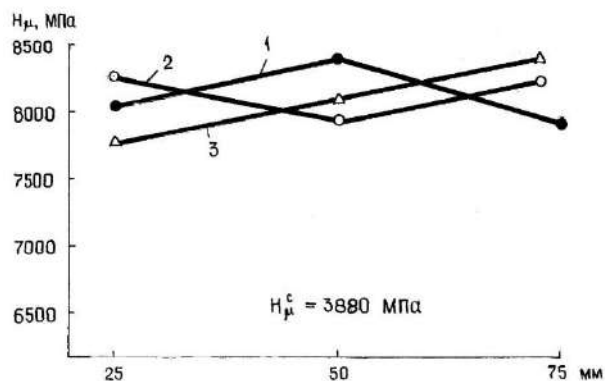


Рисунок 3.9 – Зміна мікротвердості поверхні за довжиною лопатки після УЗЗ (5 хв) + КІБ

1 – спинка; 2 – вхідна кромка; 3 – вихідна кромка

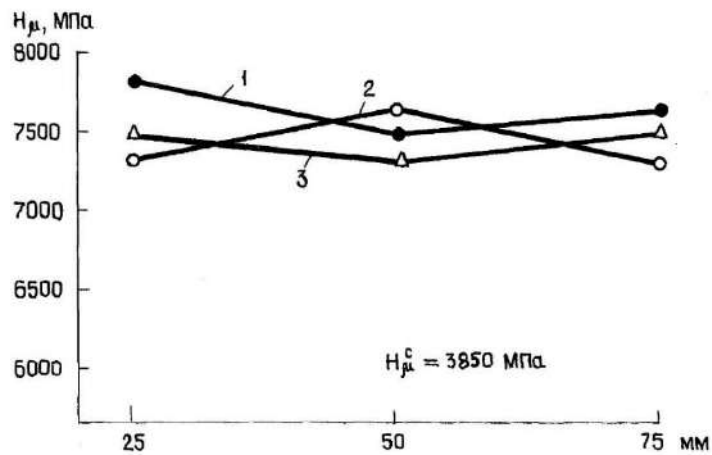


Рисунок 3.10 – Зміна мікротвердості поверхні за довжиною лопатки після КІБ + УЗЗ (5 хв)

1 – спинка; 2 – вхідна кромка; 3 – вихідна кромка

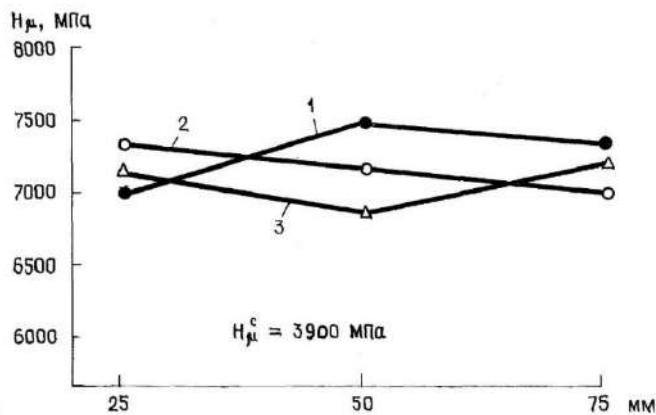


Рисунок 3.11 – Зміна мікротвердості поверхні за довжиною лопатки після КІБ + УЗЗ (10 хв)

1 – спинка; 2 – вхідна кромка; 3 – вихідна кромка

3.3 Формування залишкових напружень на поверхні лопаток

3.3.1 Визначення залишкових напружень механічним методом

Залишкові стискаючі напруження, що сформувалися в приповерхневому шарі в процесі механічної обробки, істотно впливають на швидкість розвитку втомної тріщини, що призводить до підвищення опору втоми лопаток компресора [58, 59]. Слід зазначити, що стискаючі напруження знижують рівень знакозмінних

напружень, що розтягують, а також зменшують ймовірність зародження втомних тріщин на кромках лопаток за наявності експлуатаційних пошкоджень.

Для оцінки впливу методів оздоблювально-зміцнювальної та комплексної обробки характер формування залишкового напруженого стану поверхневого шару лопаток I-й ступені компресора сплаву з ВТ8М отримали епюри залишкових напружень механічним методом (рис. 3.12...3.14).

Епюри побудовані за середніми значеннями залишкових напружень, виміряних на трьох лопатках, оброблених одним з фінішних методів.

З рис. 3.12 видно, що нанесення покриття на віброполіровану поверхню призвело до збільшення рівня стискаючих напружень біля поверхні з 370 до 580 МПа.

Ймовірно, це викликано тим, що покриття TiN має значно більший питомий об'єм, ніж у серцевини лопатки, і навіть у порівнянні з пластично деформованим поверхневим шаром.

Відомо, що стискаючі залишкові напруження утворюються при деформаційному зміцненні за рахунок збільшення питомого об'єму наклепаного поверхневого шару, який прагне збільшити розміри по відношенню до пружно-деформованої серцевини, яка надає силовий вплив на зміцнений матеріал.

Більш інтенсивна силова взаємодія із серцевиною відбувається у поверхневому шарі пера лопатки при нанесенні покриття. Вищий рівень стискаючих напружень в лопатках з покриттям порівняно з ультразвуковим зміцненням пояснюється його малою товщиною (4-5 мкм) – після УЗЗ (10 хв) глибина зміцненого шару досягає 110 мкм.

Після УЗЗ протягом 5 хв рівень стискаючих напружень біля поверхні збільшується з 370 МПа (ВП) до 520 МПа, а глибина залягання з 25 до 40 мкм; після УЗЗ (10 хв) – до 430 МПа та 110 мкм відповідно.

Наступне напилення КІБ підвищує рівень стискаючих напружень біля поверхні до 720-660 МПа, що значно вище, ніж після ВП+КІБ. При цьому глибина залягання напружень практично не змінюється.

Таким чином, має місце прояв спадковості.

Характерно, що ультразвукове зміцнення покриття (рис. 3.13, 3.14) призвело до зниження рівня стискаючих напружень до 660 МПа – УЗЗ (5 хв) та 550 МПа – УЗЗ (10 хв) та незначного зменшення глибини залягання.

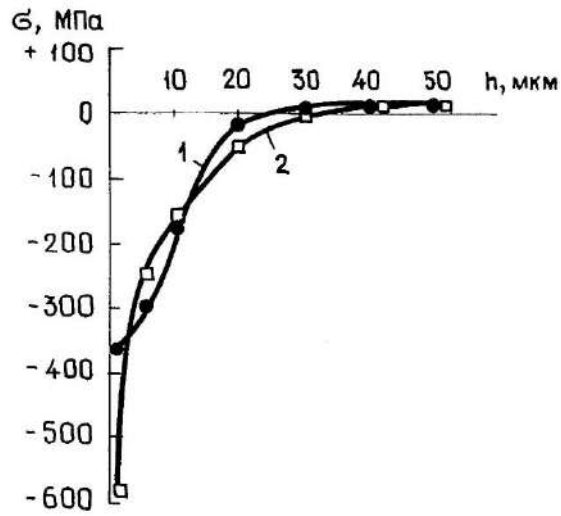


Рисунок 3.12 – Епюри розподілу залишкових напружень після:

1 - ВП; 2 - ВП + КІБ

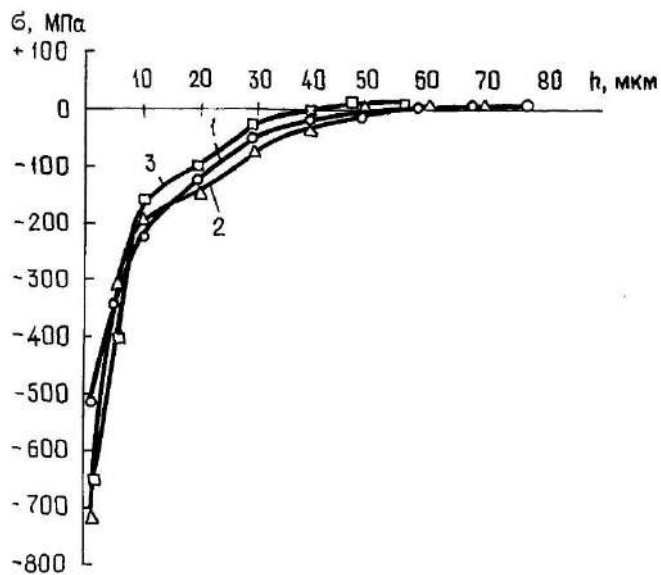


Рисунок 3.13 – Епюри розподілу залишкових напружень після:

1 – УЗЗ (5 хв); 2 – УЗЗ (5 хв) + КІБ; 3 – КІБ + УЗЗ (5 хв)

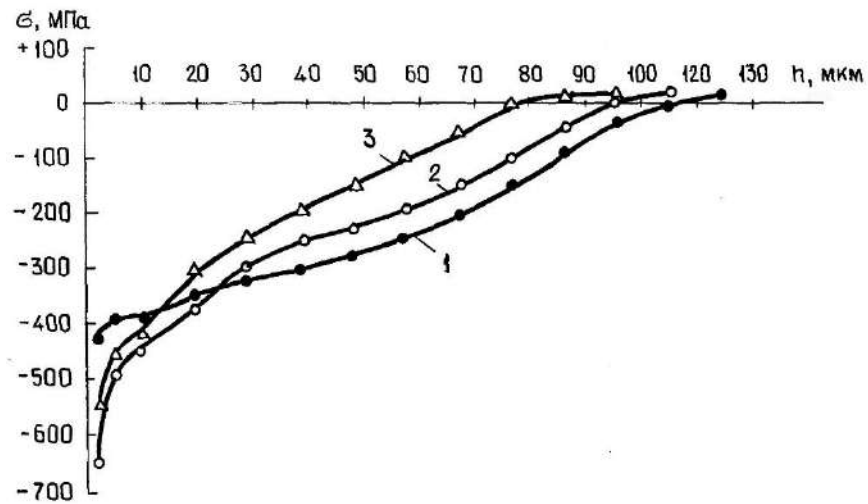


Рисунок 3.14 – Епюри розподілу залишкових напружень після:

1 – УЗЗ (10 хв); 2 - УЗЗ (10 хв) + КІБ; 3 – КІБ + УЗЗ (10 хв)

Залишкові напруження визначали за формулою для лінійного напруженого стану

$$\sigma_{ост} = \frac{4EH^2}{3a^2(1-\mu)} \frac{f}{h}, \quad (3.1)$$

де $E = 1,15 \cdot 10^5$ МПа – модуль Юнга;

$H=3$ мм - товщина зразка;

$a=80$ мм- довжина зразка;

$\mu=0,3$ коефіцієнт Пуассона.

Зразки піддавали ультразвуковому зміцненню та напиленню TiN у закріпленому стані з одного боку. Після комплексної обробки у вільному стані зразок деформувався через перерозподіл залишкових напружень у напрямку зміцненої поверхні. Це підтверджувало, що в процесі комплексної обробки були наведені стискаючі залишкові напруження. Величина прогину була виміряна на контрольному столі за допомогою пристрою з індикаторним годинником (ціна поділу – 1 мкм).

Результати виміряних деформацій зразків та розрахованих величин залишкових напружень представлені у табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Результати досліджень залишкових напружень після комплексної обробки зразків зі сплаву ВТ8М

Вид обробки	Довжина зразка а, мм	Стріла прогину f, мм	$\sigma_{ост}$, МПа
ВП+КІБ	79,8	-0,004	-650
ВП+УЗЗ(5хв)+КІБ	80,1	-0,0105	-810
ВП+УЗЗ(10хв)+ КІБ	79,8	-0,10	-790
ВП+ КІБ+УЗЗ(5хв)	79,9	-0,009	-700
ВП+ КІБ+УЗЗ(10хв)	80	-0,0078	-600

Як видно з табл. 3.3 рівень залишкових напружень виявився дещо нижчим, ніж рівень напружень, виміряних механічним методом.

Характерно, що найменший рівень напружень було зафіксовано після ультразвукового зміцнення покриття протягом 10 хв, що підтверджує результати досліджень мікроструктури.

3.4 Визначення адгезійної міцності покриттів методом КІБ

Дослідженням піддавали плоскі зразки (3×8×80) остаточно оброблені ВП+КІБ, УЗЗ+КІБ та ультразвукове зміцнення з подальшим глянсуванням (тонким поліруванням)+КІБ. Глянцювання доцільно застосовувати для тонких кромок лопаток при усуненні задирок, утворених у процесі ультразвукового зміцнення кульками.

Попередню напилювання ультразвукову обробку виконували за серійною технологією зміцнення лопаток III-ступені КНД двигуна Д-36 протягом 5 та 10 хв.

Випробування проводили методом згинання зразків за допомогою ступінчастого валу послідовно зменшуючи діаметр сходинки до появи розтріскування нітрид титанового покриття, видимого при 18,6-кратному збільшенні.

Зразки з покриттям до та після випробувань представлені на рис. 3.22.

Слід зазначити, що руйнування покриттів відбувалося тільки на поверхні зразка, підданої навантаженням, що стискають.

Для оцінки адгезійної міцності покриття проводили розрахунок стискаючих напружень за формулою (3.2):

$$\sigma = \varepsilon \cdot E, \quad (3.2)$$

де $E = 1,20 \cdot 10^5$ МПа – модуль пружності; ε – ступінь деформації, який визначається за формулою (3.3):

$$\varepsilon = f \frac{h}{l^2}, \quad (3.3)$$

де f – величина прогину (деформація) у центральній частині зразка (рис. 3.23); $h = 3$ мм - товщина зразка; $l = 40$ мм - довжина досліджуваної частини зразка.

Величина прогину f визначається із залежності [78]

$$R = \frac{(AB/2)^2 - f^2}{2f}, \quad (3.4)$$

де R - радіус сходинки валу, по якій проводиться обтискання зразків; AB – довжина хорди зразка (рис. 3.23) у процесі пружно-пластичної деформації, яка визначається за формулою

$$AB = 2R \sin \frac{\alpha}{2}, \quad (3.5)$$

де α – центральний кут (рис. 3.23), що визначається за формулою

$$\alpha = \frac{l}{R}, \text{ радий.} \quad (3.6)$$

Результати розрахунків стискаючих напружень представлені в табл. 3.7.

Таблиця 3.7 – Результати досліджень адгезійної міцності

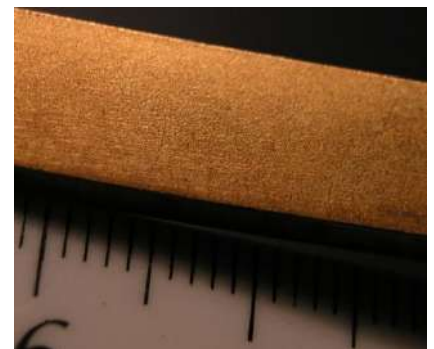
Метод комплексної обробки	α , град	AB , мм	f , мм	ε	R , мм	σ , МПа
ВП + КІБ	36,99	39,33	3,04	0,0057	62	684
УЗЗ(5 хв) + КІБ	36,99	39,33	3,04	0,0057	62	684
УЗЗ+глянцування + КІБ	40,92	39,149	3,322	0,0062	56	744
УЗЗ(10 хв) + КІБ	36,99	39,33	3,04	0,0057	62	684



а



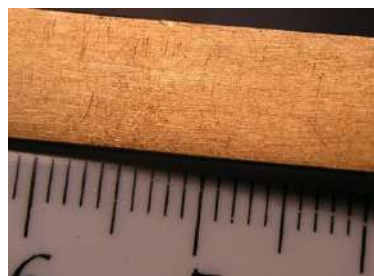
б



в



г



д

Рисунок 3.22 – Поверхня зразків після напилення: а - до обтискання та після обтиснення: б – ВП + КІБ; в – УЗЗ(5 хв) + КІБ; г - УЗЗ (10 хв) + КІБ; д - УЗЗ + глянцування + КІБ

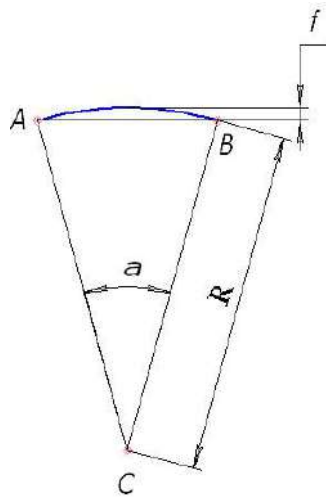


Рисунок 3.23 – Схема деформації зразка при згинанні на ступінчастому валу

Як очевидно з табл. 3.7 комплексні методи зміцнення (ВП+КІБ та УЗЗ+КІБ) практично не призводять до зміни адгезійної міцності.

Збільшення рівня стискаючих напружень (адгезійної міцності) з 656 до 713 МПа спостерігається у зразків, підданих глянсуванню після УЗЗ, що пояснюється поліпшенням мікрорельєфу та зниженням рівня стискаючих напружень, утворених при ультразвуковому зміцненні.

Таким чином, на кромках, які найінтенсивніше піддаються ерозійному зносу, слід очікувати підвищення адгезійної міцності нітрид титанового покриття при застосуванні глянсування після УЗЗ.

3.5 Висновки

1. Встановлено, що найбільш сприятливий мікрорельєф і низькі значення параметра шорсткості R_a ($R_a=0,22...0,28$ мкм) були отримані на лопатках, що піддані ультразвуковому зміцненню з подальшим напилюванням TiN.

2. Дослідження параметрів наклепу показали, що ультразвукове зміцнення призводить до підвищення ступеня наклепу з 9% (ВП) до 19...20%. Наступні нанесення іонно-плазмового покриття TiN після ВП та УЗЗ підвищує ступінь наклепу до 101 і 109% відповідно.

3. Дослідження залишкового напруженого стану приповерхневого шару показали, що після УЗЗ (5 хв) рівень стискаючих напружень збільшується з 370 МПа (ВП) до 520 МПа. Наступне нанесення покриття TiN підвищує рівень стискаючих напружень до 720 МПа.

4. Комплексні методи зміцнення (ВП+КІБ та УЗЗ+КІБ) практично не призводять до зміни адгезійної міцності.

Збільшення рівня стискаючих напружень (адгезійної міцності) з 684 до 744 МПа спостерігається у зразків, підданих глянсуванню після УЗЗ, що пояснюється поліпшенням мікрорельєфу та зниженням рівня стискаючих напружень, утворених при ультразвуковому зміцненні.

РОЗДІЛ 4**ОЦІНКА ВПЛИВУ ОБРОБНО-ЗМІЦНЮВАЛЬНОЇ ТА
КОМПЛЕКСНОЇ ОБРОБКИ НА НЕСУЧУ ЗДАТНІСТЬ ЛОПАТОК****4.1 Визначення напружено-деформованого стану лопатки компресора з
концентраторами напружень**

У процесі експлуатації вертолітних ГТД в умовах запиленості повітря лопатки компресора піддаються газоабразивній ерозії внаслідок дії високошвидкісних твердих частинок пилу.

Огляд лопаток після напрацювання в експлуатації показує, що кількість ерозійних пошкоджень на кориті та вхідній кромці значно більша, а самі вони глибші, ніж ушкодження на спинці. Нерівномірність розподілу пошкоджень по поверхні пера пояснюється аеродинамічними умовами роботи лопаток, при яких вхідна кромка і корито більшою мірою пошкоджені інтенсивному ерозійному впливу повітряного потоку, що містить тверді і рідкі частинки.

Відомо, що сплав ВТ8М має високі характеристики міцності, здатний їх зберігати при тривалій експлуатації, але дуже чутливий до наявності концентраторів напружень.

Дослідження зламів зруйнованих лопаток першої ступені компресора двигуна ТВ3-117В при випробуванні на втому та в процесі експлуатації показали, що, як правило, втомні тріщини зароджуються з боку вхідної кромки. Конструктивні особливості лопаток такі, що вхідна кромка та спинка є найбільш напруженими елементами профілю.

Поява пошкоджень кромки і пера лопатки у вигляді вибоїн, що збільшують рівень локальних вібронапруження в місці виникнення концентратора, підвищує ймовірність втомного руйнування лопаток.

Аналіз пошкоджень компресорів двигунів показав, що І-я ступінь компресора істотно відрізняється за кількістю лопаток, що мають вибоїни. Лопатки з пошкодженнями глибиною не менше 0,3...0,5мм рівномірно розподілені на всіх ступенях компресора, крім першої, де вибоїн приблизно в 4 рази більше, ніж на

будь-якому наступному ступені. Загальна кількість вибоїн зменшується на 2-ій та 3-ій ступенях порівняно з I-м. Зменшення числа великих пошкоджень на всіх ступенях порівняно з I-їй можна пояснити руйнуванням великих частинок лопатками I-го ступеня [1].

У зв'язку з цим було проведено дослідження щодо визначення впливу параметрів та кількості пошкоджень на напружено-деформований стан (НДС) лопатки осевого компресора. Ушкодження виконані на вхідній кромці у формі напівсфери у різних перерізах пера лопатки. Причому аналізовані як поодинокі (тільки в одному перерізі), так і групові (у кількох перерізах одночасно) ушкодження.

Об'єктом дослідження служили віртуальні моделі робочої лопатки I-ї ступені компресора двигуна ТВЗ-117В з нанесеними ушкодженнями радіусами R0,25; R0,5 та R1,0 мм у шести перерізах пера лопатки (рис. 4.1).

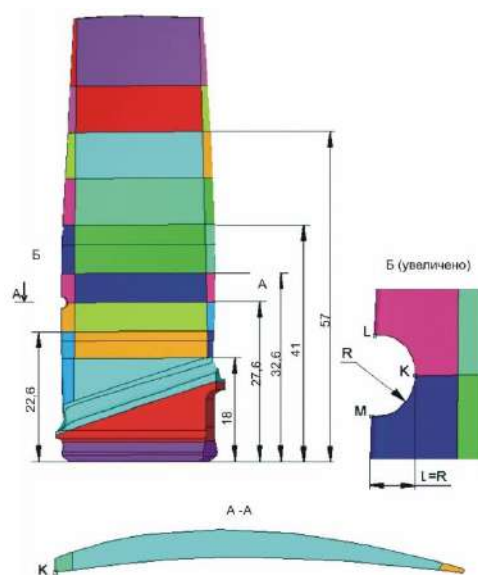


Рисунок 4.1 – Геометрична модель лопатки з пошкодженням вхідної кромки

Розробку кінцево-елементної моделі лопатки здійснили шляхом створення сітки кінцевих елементів за допомогою препроцесора автоматичного розбиття ANSYS.

Величини еквівалентних напружень на поверхні пера лопатки визначили за формулою (4.1):

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{экв}} &= \left\{ \frac{1}{2} \left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6 \cdot (\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{xz}^2) \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \\ \sigma_{\text{экв}} &= \left\{ \frac{1}{2} \left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6 \cdot (\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{xz}^2) \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (4.1)$$

Відносне напруження було розраховано в точках профілю пера лопатки за формулою (4.2):

$$\sigma_{li} = \frac{\sigma_i}{\sigma}, \quad (4.2)$$

де σ_i - еквівалентне напруження в точці і-го перерізу лопатки;

σ – напруження в точці перетину на відстані 27,6 мм від підоснови хвостовика лопатки (рис.4.2).

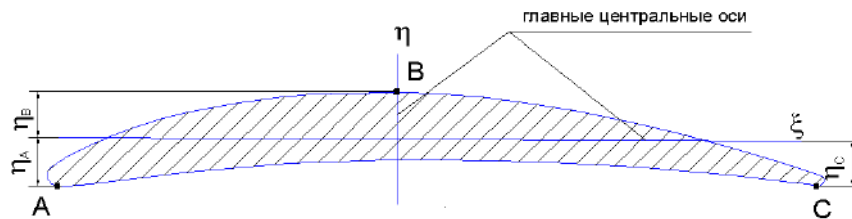


Рисунок 4.2 – Розташування точок А, В, С у перерізі пера лопатки

Кінцево-елементна модель лопатки залежно від розмірів та кількості пошкоджень містить від 98 до 117 тисяч елементів та від 140 до 180 тисяч вузлів (рис. 4.3).

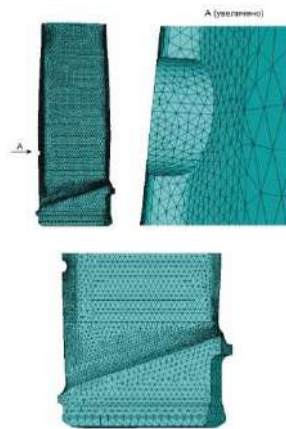


Рисунок 4.3 – Ескіз звичайно-елементної моделі лопатки

За результатами модального аналізу під час перегляду відео файлу характером переміщень точок поверхні пера лопатки було встановлено, що форма коливань на частоті $f = 646$ Гц – перша згинальна. НДС лопатки при імітації ушкоджень вхідної кромки наведено на рис. 4.4.

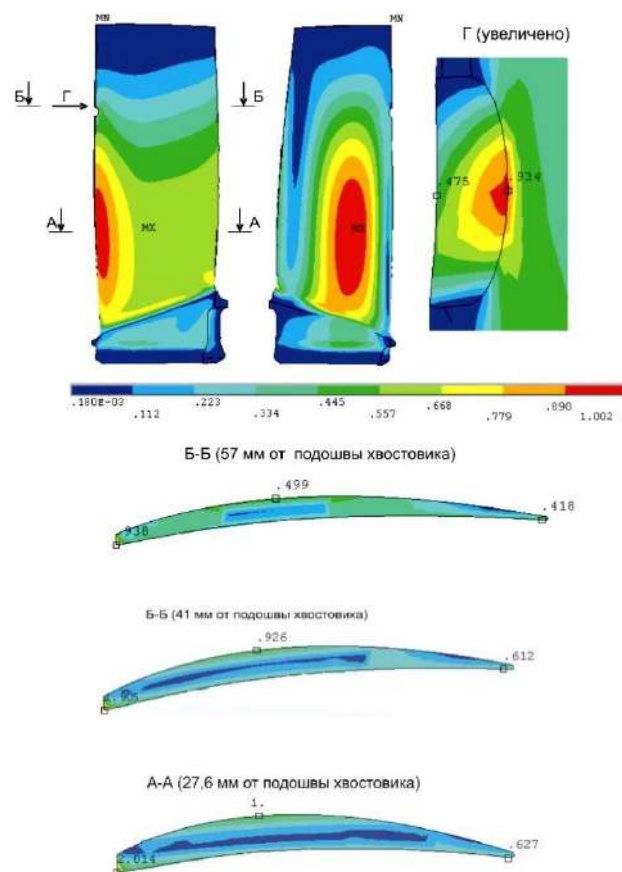


Рисунок 4.4 – ПДВ лопатки при коливаннях за першою згинальною формою (пошкодження R1,0мм)

Як видно із рис. 4.4, максимальне напруження спостерігається у місці пошкодження (точка К, рис. 4.1), крім випадку пошкодження в перерізі на відстані 57 мм від підшви хвостовика.

Встановлено, що величина напружень у точках L і М значно менше, ніж у точці К.

При аналізі пошкодження у перерізі на відстані 32,6 мм від підшви хвостовика відзначено максимальне напруження (табл. 4.1 і рис. 4.5).

Таблиця 4.1 – Еквівалентні напруження на пері лопатки (поодинокі пошкодження)

Коорд. перерізу, мм	Розмір ушкодження, мм	Лопатка без пошкоджень	Координати перерізів з ушкодженнями, мм					
			18	22,6	27,6	32,6	41	57
1	2	3	4	5	6	7	8	9
18	0,25	0,88	1,60 *	0,85	0,86	0,87	0,88	0,87
	0,50		1,84 *	0,85	0,86	0,87	0,88	0,87
	1,00		1,80 *	0,85	0,86	0,87	0,88	0,87
22,6	0,25	0,93	0,93	1,84 *	0,91	0,93	0,93	0,93
	0,50		0,92	2,00 *	0,90	0,93	0,93	0,93
	1,00		0,92	1,96 *	0,90	0,92	0,93	0,93
27,6	0,25	0,95	0,95	0,95	1,98 *	0,95	0,95	0,95
	0,50		0,95	0,95	2,09 *	0,95	0,95	0,95
	1,00		0,95	0,92	2,01 *	0,93	0,95	0,95
32,6	0,25	0,95	0,95	0,95	0,93	2,15 *	0,95	0,95
	0,50		0,95	0,95	0,93	2,19 *	0,95	0,95
	1,00		0,95	0,95	0,93	2,06 *	0,95	0,95
41	0,25	0,88	0,87	0,87	0,87	0,87	2,04 *	0,87
	0,50		0,87	0,87	0,87	0,87	1,98 *	0,87
	1,00		0,87	0,87	0,86	0,87	1,91 *	0,87

1	2	3	4	5	6	7	8	9
57	0,25	0,41	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	1,02 *
	0,50		0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,90 *
	1,00		0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,94 *

Примітка: 1. вказані напруження в точці А (за "1" прийнята величина напружень в точці В перерізу на відстані 27,6 мм від підшви хвостовика); 2. * точка А – відсутня, вказано напруження у т. К (рис. 4.1)

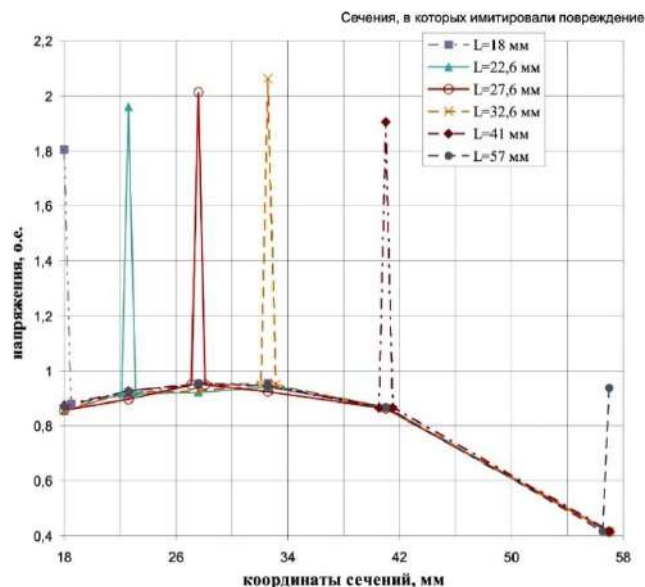


Рисунок 4.5 – Залежність величини максимальних напружень в точці А (т. К) вхідної кромки від параметрів пошкодження (координати та радіуса) вхідної кромки

Примітка: 1. У перерізах з ушкодженнями напруження вказані у точці К; 2. За "1" прийнята величина напружень у точці перетину на відстані 27,6 мм від підшви хвостовика

Зміна максимальних напружень в залежності від параметрів пошкодження наведена на рис. 4.6.

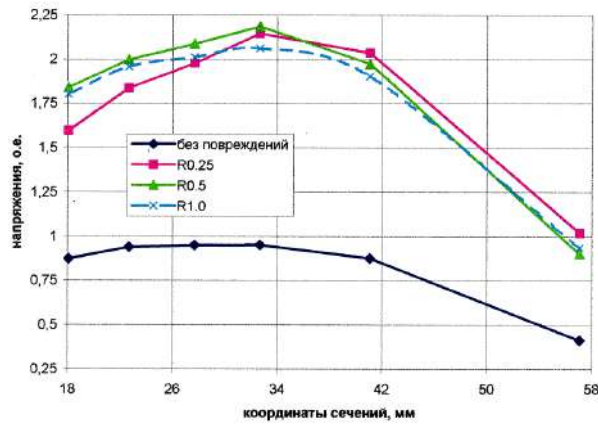


Рисунок 4.6 – Величини максимальних напружень у точці А (т. К) залежно від параметрів uszkodження (координати та радіуса)

Примітка: 1. У перерізах з uszkodженнями напруження вказані у точці К; 2. За "1" прийнята величина напружень у точці перетину на відстані 27,6 мм від підшви хвостовика

Окрім поодиноких uszkodжень було розглянуто НДС лопатки за наявності групових uszkodжень у трьох перерізах.

Групові uszkodження імітували у перерізах 27,6; 41 і 57 мм від підшви хвостовика (табл. 4.2 та рис. 4.7).

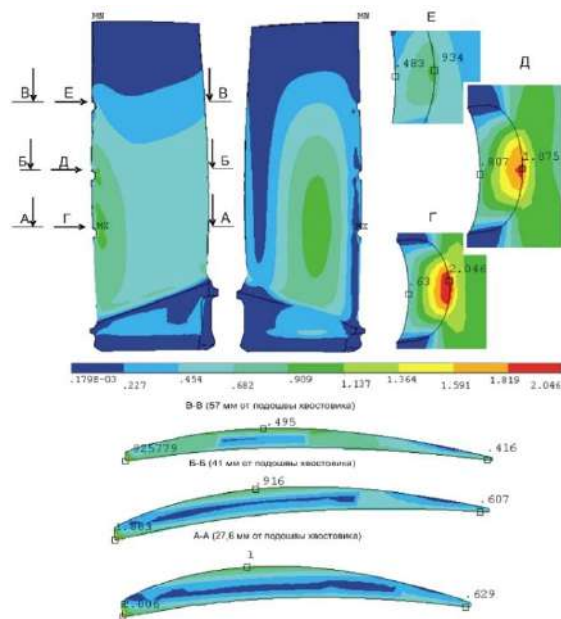


Рисунок 4.7 – НДС лопатки при коливаннях по першій згинальній формі (ушкодження R1,0 мм)

Порівняння величини максимальної та при імітації одиничних (табл. 4.1) і групових (табл. 4.2) пошкоджень вхідної кромки показало, що величина максимальних напружень не істотно залежить від кількості пошкоджень.

Таблиця 4.2 – Еквівалентні напруження на пері лопатки (групові ушкодження)

Коорд. перерізу, мм	Розмір ушкодження, мм	Лопатка без пошкодження	Координати перерізів з ушкодженнями, мм			
			27,6 та 41	27,6 та 57	41 та 57	27,6; 41; 57
27,6	0,25	0,95	1,98 *	2,07 *	0,95	2,00 *
	0,50		2,08 *	2,06 *	0,95	2,11 *
	1,0		1,99 *	2,01 *	0,95	2,05 *
41	0,25	0,88	2,04 *	0,87	1,99 *	1,99 *
	0,50		1,99 *	0,87	1,96 *	1,86 *
	1,0		1,98 *	0,86	1,91 *	1,88 *
57	0,25	0,41	0,42	1,02 *	1,03 *	1,03 *
	0,50		0,42	0,92 *	1,00 *	0,91 *
	1,0		0,42	0,93 *	0,94 *	0,93 *

Примітка: 1. вказані напружень в точці А (за "1" прийнята величина напружень в точці В перерізу на відстані 27,6 мм від підшви хвостовика); 2. * точка А – відсутня, вказано напруження у т. К (рис. 2)

Таким чином, дослідження НДС лопатки компресора показали, що максимальні напруження у вихідній лопатці (без пошкоджень) розташовані в точці перетину В на відстані 27,6 мм від підшви хвостовика.

При пошкодженні вхідної кромки:

- у перерізах до 57 мм від підшви хвостовика максимальні напруження відзначається у зоні ушкодження;

- у перерізі до 57 мм – напруження в зоні пошкодження чисельно рівні максимальним напруженням у вихідній лопатці.

При цьому величина напружень на спинці і вихідній кромці не змінюється в порівнянні з величиною напруження у вихідній лопатці.

Величина максимальних напружень залежить від параметрів пошкодження та при пошкодженні в перерізах до 43 мм від підшви хвостовика приблизно вдвічі вище, ніж у вихідній лопатці.

- Розмір пошкоджень (0,25; 0,5; 1,0 мм) не має істотного впливу на величину максимальних напружень.

- величина максимальних напружень на пері лопатки не залежить від кількості пошкоджень (від 1 до 3-х на лопатці), розташованих на вхідній кромці в межах від 27,6 до 57 мм від підшви хвостовика.

Таким чином, найбільшу концентрацію напружень створюють пошкодження, покладені поблизу хвостовика лопатки - рівень напружень при пошкодженні R 0,25 до R0,1 мм збільшується вдвічі.

4.2 Вплив оздоблювально-зміцнювальної та комплексної обробки пера на опір втомі

Лопатки I-й ступені компресора із сплаву VT8 остаточно обробляються віброполіруванням з наступним нанесенням іонно-плазмового покриття TiN на верхню половину пера для підвищення ерозійної стійкості.

Раніше проведені дослідження лопаток з напрацюванням у межах 1000... 1900 годин показали, що ерозійні ушкодження (кратери) на окремих ділянках вхідної кромки та корита спостерігаються і в нижній частині пера у комля, де рівень циклічних напружень є максимальним. Наявність пошкоджень кромки радіусом R 0,25 на відстані 27 мм від підшви замка призводить до підвищення рівня концентрації напружень вдвічі (рис. 4.6).

У зв'язку з цим проведено дослідження витривалості лопаток, оброблених комплексними методами: ультразвукове зміцнення + нанесення покриття TiN на перо лопатки. Для отримання порівняльних даних застосовували ультразвукове зміцнення лопаток із покриттям з різними режимами. Ультразвукове зміцнення виконували за серійною технологією обробки лопаток III-й ступені КНД двигуна Д-36 із зменшенням тривалості від 10 хв (за серійною технологією) до 5 хв. За такого «щадного» режиму можна виключити перенаклеп тонких кромки і забезпечити необхідні параметри поверхневого шару.

Нанесення покриття TiN також робили за серійною технологією.

Після проведення досліджень щодо вибору та обґрунтування оптимального варіанту комплексного зміцнення лопаток I-й ступені компресора двигуна ТВЗ-117 були зміцнені з нанесенням покриття TiN і випробувані на втому лопатки III ступені КНД двигуна Д-36.

Випробовуванням піддавали лопатки після нетривалого напрацювання, відновлених до рівня серійних лопаток віброполіруванням. Одна партія лопаток з напрацюванням 1839 год була піддана комплексній обробці (УЗЗ (5 хв) + КІБ) без відновлення характеристик поверхневого шару віброполіруванням для отримання порівняльних даних. Також була випробувана партія лопаток після ультразвукового зміцнення (5 хв) з подальшим нанесенням покриття на верхню половину пера відповідно серійної технології.

Випробування на втому виконували прискореним методом «сходів» з урахуванням 20 млн. циклів (табл. 4.3... 4.10 і рис. 4.8) і стандартним методом з урахуванням 100 млн. циклів (табл. 4.11, 4.12).

Серійні лопатки, випробувані з урахуванням 20 млн. циклів, мають такі параметри: $\bar{\sigma}_{-1} = 575$ МПа; $\bar{s}_{\sigma_{-1}} = 54,1$ МПа; $\bar{\sigma}_{-1(p=10\%)} = 506$ МПа.

Таблиця 4.3 – Результати випробування лопаток після УЗЗ (5 хв) + напилення КІБ верхньої половини пера (Н. 883 год)

Шифр лопаток	Напруження випробування, МПа	Число циклів, млн.	Примітка
1	2	3	4
У1-1	660	0,35	Руйнування по вх. кр. L =26 мм
У1-2	640	10,3	Руйнування по вх. кр. L =26 мм
У1-7	620	20,0	Не зруйнувалася
1	2	3	4
У1-8	640	20,0	Не зруйнувалася
У1-9	660	0,12	Руйнування по спинці. L =33 мм
У1-10	640	15,9	Руйнування по вх. кр. L =21,5 мм
У1-11	620	20,0	Не зруйнувалася
У1-12	640	0,33	Руйнування по спинці. L =26 мм
У1-13	620	20,0	Не зруйнувалася.
У1-14	640	20,0	Не зруйнувалася
У1-17	620	20,0	Не зруйнувалася
У1-18	640	12,5	Руйнування по вх. кр. L =25 мм

Таблиця 4.4 – Результати випробувань на втому лопаток після КІБ + УЗЗ
(5 хв) (Н. 1185 год)

Шифр лопаток	Напруження випробування, МПа	Число циклів, млн	Примітка
1	2	3	4
4-6	620	20,0	Не зруйнувалася
4-8	640	20,0	Не зруйнувалася
4-14	660	11,0	Руйнування по вх. кр. L =36 мм
4-7	640	20,0	Не зруйнувалася
4-17	660	20,0	Не зруйнувалася
4-18	680	14,5	Руйнування по вх. кр. L =19,5 мм
4-20	660	8,3	Руйнування по вх. кр. L =39 мм
4-19	640	13,7	Руйнування по вх. кр. L =21,5 мм
4-22	620	20,0	Не зруйнувалася
1	2	3	4
4-11	640	20,0	Не зруйнувалася
4-10	660	20,0	Не зруйнувалася
4-9	680	20,0	Не зруйнувалася

Таблиця 4.5 – Результати випробувань на втому лопаток без ВП після УЗЗ
($\tau=5$ хв) + КІБ (Н. 201/1839 год) Число циклів, млн.

Шифр лопаток	Напруження випробування, МПа	Число циклів, млн.	Примітка
П3	660	1,98	Руйнування по спинці. . L =36 мм
П4	640	0,35	Руйнування по вх. кр. L =41 мм
П5	620	0,31	Руйнування по вх.кр. L = 39 мм
П7	600	20,0	Не зруйнувалася
П10	620	0,27	Руйнування по вх. кр. L = 41 мм
П13	600	20,0	Не зруйнувалася
П14	620	20,0	Не зруйнувалася
П21	640	1,36	Руйнування по вх. кр. L =30 мм
П22	620	20,0	Не зруйнувалася
П24	640	0,38	Руйнування по вх. кр. L =43 мм
П30	620	20,0	Не зруйнувалася
П00	640	8,95	Руйнування по вх. кр L =24 мм

Таблиця 4.6 – Результати випробувань на втому лопаток після ВП + КІБ (Н.833 год)

Шифр лопаток	Напруження випробування, МПа	Число циклів, млн.	Примітка
1-2	560	20,0	Не зруйнувалася
1-6	580	20,0	Не зруйнувалася
1-3	600	16,3	Руйнування по вх. кр. L =27 мм
1-5	580	20,0	Не зруйнувалася
1-14	600	19,3	Руйнування по вх. кр. L =29 мм
1-16	580	20,0	Не зруйнувалася
1-12	600	20,0	Не зруйнувалася
1-8	620	20,0	Не зруйнувалася
1-10	640	10,7	Руйнування по вх. кр. L =25 мм
1-34	620	20,0	Не зруйнувалася
1-15	640	0,1	Руйнування по спинці. L =31 мм
1-5	620	0,35	Руйнування по вх. кр. L =32 мм

Таблиця 4.7 – Результати випробувань на втому лопаток після КІБ + УЗЗ (10 хв) – напрацювання 1185 год

Шифр лопаток	Напруження випробування, МПа	Число циклів, млн.	Примітка
1	2	3	4
4-3	600	20,0	Не зруйнувалася
4-4	620	1,4	Руйнування по вх.кр. L = 25 мм
4-13	600	20,0	Не зруйнувалася
4-11	620	7,9	Руйнування по вх.кр. L =47 мм
4-27	600	20,0	Не зруйнувалася
4-24	620	20,0	Не зруйнувалася
4-33	640	12,4	Руйнування по вх.кр. L =37 мм
4-15	620	20,0	Не зруйнувалася
4-4	640	20,0	Не зруйнувалася
4-10	660	20,0	Не зруйнувалася
4-3	680	10,1	Руйнування з вих.кр. L = 19 мм
4-4	660	1,35	Руйнування по вх.кр. L = 23 мм

Таблиця 4.8 – Результати випробувань на втому лопаток (Н. 1185 год) після УЗЗ (10 хв) + КІБ

Шифр лопаток	Напруження випробування, МПа	Число циклів, млн	Примітка
2-10	580	20,0	Не зруйнувалася
2-11	600	20,0	Не зруйнувалася
2-15	620	5,119	Руйнування по спинці, L = 16 мм
2-17	600	20,0	Не зруйнувалася
2-18	620	20,0	Не зруйнувалася
2-19	640	20,0	Не зруйнувалася
2-20	660	4,725	Руйнування по вх. кр. L = 29 мм
2-21	640	19,16	Руйнування по вх. кр. L = 24 мм
2-22	620	19,527	Руйнування по вх. кр. L = 33 мм
2-23	600	20,0	Не зруйнувалася
2-24	620	20,0	Не зруйнувалася
2-25	640	6,01	Руйнування по вх. кр. L = 25 мм

Таблиця 4.9 – Результати випробувань на втому лопаток після УЗЗ ($\tau=5$ хв) + КІБ (Напрацювання 443 год)

Шифр лопаток	Напруження випробування, МПа	Число циклів, млн.	Примітка
2-9	620	20,0	Не зруйнувалася
2-14	640	20,0	Не зруйнувалася
2-16	660	20,0	Не зруйнувалася
2-22	680	20,0	Не зруйнувалася
2-24	700	5,41	Руйнування по вх. кр. L = 23 мм
2-27	680	0,93	Руйнування по вх. кр. L = 27 мм
2-30	660	20,0	Не зруйнувалася
2-31	680	5,51	Руйнування за вих. кр. L = 28 мм
2-32	660	20	Не зруйнувалася
2-33	680	3,51	Руйнування по спинці. L = 34 мм
2-14	660	20,0	Не зруйнувалася
2-16	680	6,82	Руйнування по вх. кр. L = 26 мм

Таблиця 4.10 – Параметри витривалості лопаток

Параметри витривалості. МПа	ВП+ КІБ, Н.833	КІБ+ УЗЗ (5хв), Н. 1185 год	УЗЗ (5хв)+ КІБ Н.201/1839 без СП	УЗЗ(10хв) + КІБ, Н. 443 год	УЗЗ(5хв)+ КІБ, Н. 443 год	КІБ+УЗЗ 3 (10 хв), Н.1185 год	УЗЗ ($\tau=5$ хв) + $\frac{1}{3}$ КІБ, Н. 883 год
$\bar{\sigma}_{-1}$	590	630	604	606	654	614	616
$S\sigma_{-1}$	26,8	17,1	26,1	32	26,8	45	61
σ_{-1} (P = 10%)	556	608	571	565	620	556	537
ν	0,045	0,027	0,043	0,053	0,041	0,073	0,10
До _i	0,528	0,622	0,346	0,57	0,618	0,407	0,64

Аналіз результатів випробувань на втому показав, що найвищі параметри витривалості з урахуванням розсіювання забезпечує УЗЗ (5 хв) + КІБ: $\bar{\sigma}_{-1} = 654$ МПа та $\sigma_{-1(p=10\%)} = 620$ МПа. Для порівняння напилення TiN лопаток після віброполірування забезпечує отримання більш низьких параметрів витривалості: $\bar{\sigma}_{-1} = 590$ МПа та $\sigma_{-1(p=10\%)} = 556$ МПа, але трохи вище, ніж після напилення верхньої половини пера. В цьому випадку втомні тріщини зароджувалися нижче напиленого шару. Слід зазначити, що у цьому випадку спостерігається найбільше розсіювання $\sigma_{-1}:v = 0,10$.

Зміцнення лопаток при тривалості 10 хв дає більш низькі результати (табл. 4.10) через перенаклеп кромки і зміцнення напиленого шару, що було показано раніше. Застосування УЗЗ без відновлення параметрів поверхневого шару віброполіруванням також не дало позитивних результатів. Характерно, що в цьому випадку спостерігається мінімальна живучість: $K_i = 0,346$.

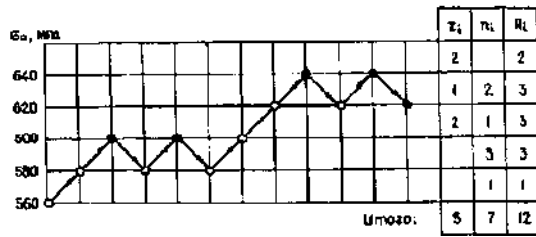
Таблиця 4.11 – Результати випробувань на втому лопаток ($N_6 = 100$ млн. циклів) після УЗЗ (5 хв) + КІБ (Н. 1083 год)

Шифр лопаток	Напруження випробування, МПа	Число циклів, млн.	Примітка
8-5-3	660	10,35	Руйнування по вх. кр. $L = 5$ мм
8-5-2	660	35,2	Руйнування по вх. кр. $L = 6$ мм
8-5-1	660	100,0	Не зруйнувалася
8-5-7	640	10,76	Руйнування за вих. кр на відстані 10 ... 20 мм від $R_{пер}$
8-5-8	640	100,0	Не зруйнувалася
8-5-10	640	96,3	Руйнування за вих. кр на відстані 10 ... 20 мм від $R_{пер}$
8-5-9	620	100,0	Не зруйнувалася
8-5-11	620	100,0	Не зруйнувалася
8-5-12	620	100,0	Не зруйнувалася
8-5-4	640	12,191	Руйнування по вх. кр. $L = 44$ мм
8-5-5	640	9,194	Руйнування по вх. кр. $L = 41$ мм
8-5-6	660	3,074	Руйнування по вх. кр. $L = 31$ мм

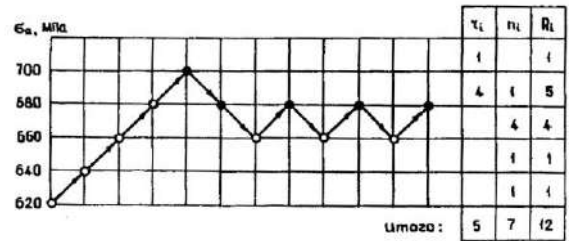
Таблиця 4.12 – Результати випробувань лопаток (серійних) після напилення (КІБ) верхньої половини пера (Nб = 100 млн. циклів)

Шифр лопаток	Напруження випробування, МПа	Число циклів, млн.	Примітка
З 1	580	18,1	Руйнування по спинці, L =23 мм
С-2	560	100,0	Не зруйнувалася
С-3	560	100,0	Не зруйнувалася
С-5	560	0,18	Руйнування по спинці, L =40 мм
С-6	540	86,4	Руйнування по спинці, L =32 мм
С-14	520	100,0	Не зруйнувалася
С-7	520	100,0	Руйнування по спинці, L =29 мм
С-19	520	100,0	Не зруйнувалася

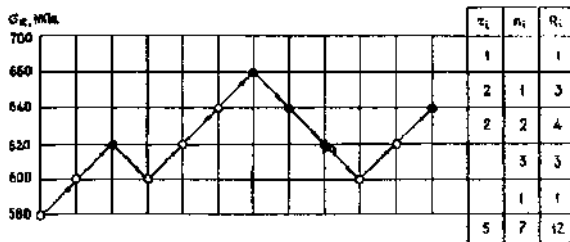
Результати випробувань лопаток на втому на базі 100 млн. цикл (табл. 4.11, 4.12) підтвердили результати прискорених випробувань і показали, що комплексне зміцнення (УЗЗ + КІБ) призводить до підвищення межі витривалості з 520 МПа (серійні лопатки з напиленням) до 620 МПа, тобто. на 19%.



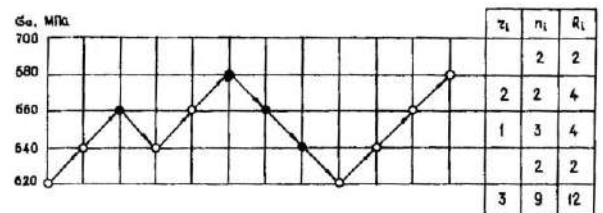
ВП (Н. 833 г.) + КІБ



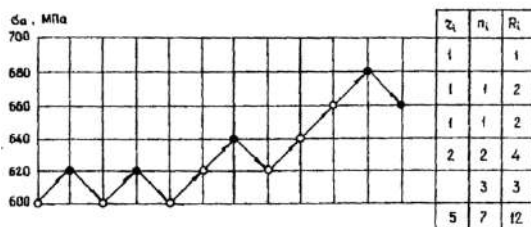
УЗЗ (5 хв) + КІБ



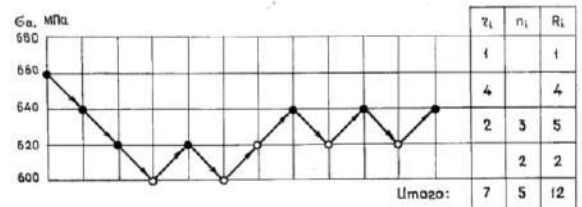
УЗЗ (10 хв) + КІБ



КІБ + УЗЗ (5 хв)



КІБ + УЗЗ (10 хв)



УЗЗ (5 хв) + КІБ без ВП

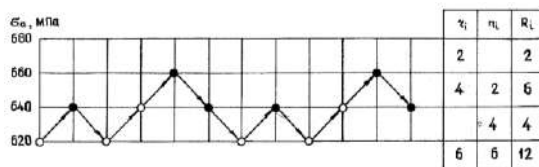
УЗУ (5хв) + $\frac{1}{2}$ КІБ

Рисунок 4.8 – Послідовність випробувань лопаток

У зв'язку з тим, що після ультразвукового зміцнення кульками протягом 10 хв (за серійною технологією лопаток III-й ступені КНД двигуна Д-36) спостерігається перенаклеп кромки, що вимагає застосування ручного полірування для видалення задирок, були проведені випробування лопаток з глясуванням (Тонким поліруванням) кромки до УЗЗ перед нанесенням іонно-плазмового покриття. Випробування лопаток, проведені на базі 100 млн. цикл (рис. 4.8-1)

показали, що межа витривалості лопаток після УЗЗ (5 хв) + КІБ з глясуванням кромки практично не змінилася ($\sigma_{-1}=610$ МПа). Межа витривалості лопаток після УЗЗ (10 хв) + КІБ з глясуванням кромки досяг 570 МПа, що вище за межу витривалості $\sigma_{-1}(p=10\%)=556$ МПа), визначеного прискореним шляхом з урахуванням 20 млн. циклів з урахуванням розсіювання.

Для підтвердження ефективності комплексної обробки лопаток перший ступіні компресора зі сплаву ВТ8М були випробувані серійні лопатки (УЗЗ -10 хв) III-й ступіні КНД двигуна Д-36 та лопатки з нанесенням іонно-плазмового покриття TiN. Як видно із рис. 4.8-2 (база – 100 млн. цикл) межа витривалості лопаток III-й ступіні КНД двигуна Д-36 збільшився з 520 до 540 МПа.

Таким чином, попередня зміцнювальна обробка формує сприятливі характеристики поверхневого шару до нанесення покриття, що підвищує опір втоми.

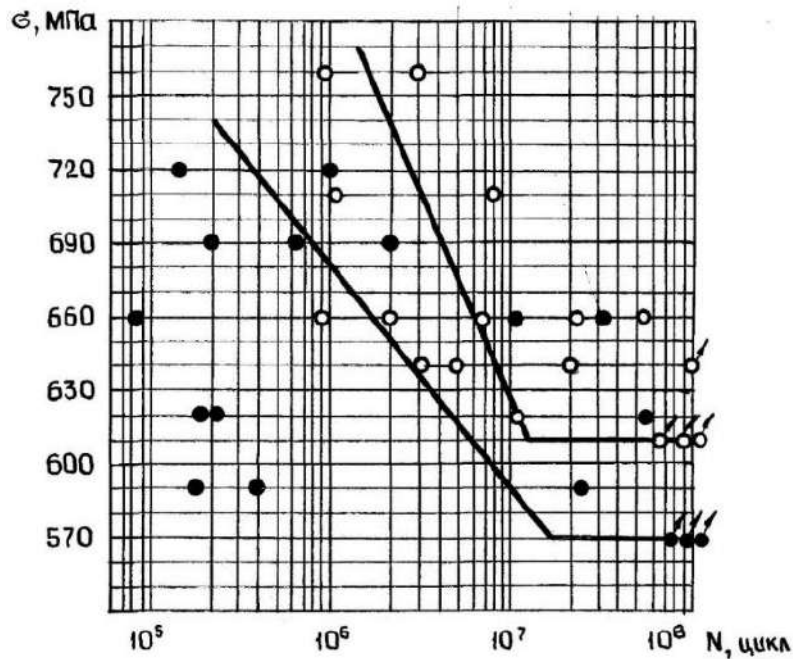


Рисунок 4.8-1 – Криві втоми лопаток з глясуванням кромки після:

○- УЗЗ (5 хв) + КІБ; ●- УЗЗ (10 хв) + КІБ

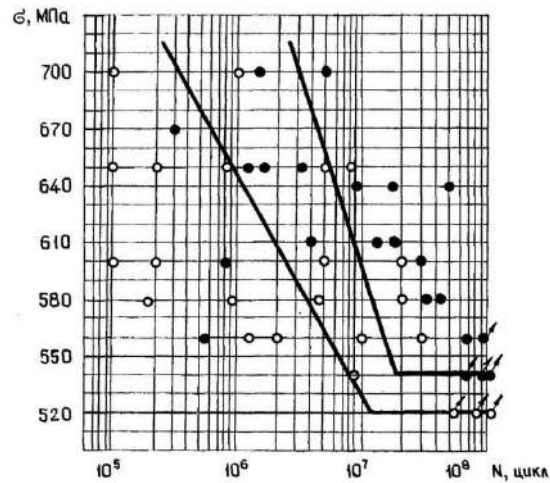


Рисунок 4.8 -2 – Криві втоми лопаток III-й ступені КНД двигуна Д-36 після:

○- УЗЗ (10 хв); ●- УЗЗ(10 хв) + КІБ

4.3 Вплив комплексної обробки на ударну міцність лопаток

Відомо, що напруги в лопатках, що обертаються, підсумовуються (з їх знаками) від сили удару, зміцнення і статичних сил [14, 12]. При цьому напруги від відцентрових сил зворотні по знаку з залишковими напругами, що стискають, що сприятливо позначається на міцності лопаток при ударі.

У роботі наведено результати випробувань на ударну міцність на відцентровому копрі, що моделює умови зіткнення лопаток другого ступеня компресора зі сплавом ВТ8 з стороннім тілом. Встановлено, що енергія удару бойка, витрачена на руйнування зміцнених лопаток на 41% більше, порівняно з величиною енергії, витраченої на руйнування серійних лопаток (остаточна обробка віброполірування).

Характерно, що стабілізуюча відпустка, застосована для зняття залишкової стискаючої напруги на зміцнених лопатках, призвела до зниження енергії удару, необхідної для ударного руйнування.

Таким чином, зміцнення, а саме залишкові стискаючі напруги позитивно впливають на ударну міцність лопаток компресора, виготовлених з титанових сплавів.

Дослідженню піддавали лопатки I-й ступені компресора (серійні та з різним напрацюванням) після оздоблювально-зміцнювальної та комплексної обробки на спеціальному копрі ударами бойка в перерізи, розташовані на відстанях 230 мм від підшви хвостовика. Після кожного методу обробки було випробувано 3 лопатки. Опір лопаток ударному руйнуванню можна визначити як енергію, що складається з двох складових: роботи деформації і роботи руйнації. У цьому передбачалося, що лопатка спочатку деформується, та руйнується без подальшої деформації. Насправді, частина лопаток з тріщинами, що утворилися, продовжувала пластично деформуватися до руйнування після нанесення додаткових ударів. Робота деформації пропорційна куту вигину зразка, що визначається за шкалою на ударній установці. При випробуваннях фіксувалася накопичена пластична деформація по куту вигину (φ , град.) з точністю $\pm 0,5^\circ$ після кожного удару до повного руйнування або появи макротріщини. Експериментальні значення вигину лопаток представлені середні значення кутів вигину, отримані в перерізах на відстанях 230 мм від підшви лопатки. На рис. 4.9...4.19 показано зміну кутів пластичного вигину ($l=30$ мм) залежно від кількості ударів; випробувані лопатки представлені на рис. 4.20...4.22.

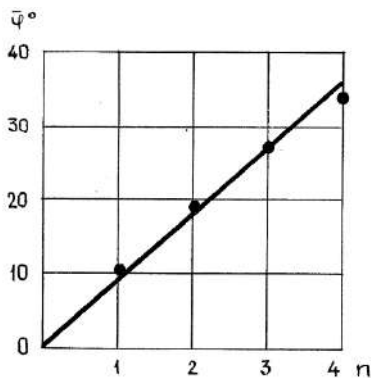


Рисунок 4.9 – Зміна кута пластичного вигину після: ВП+УЗЗ($\tau=5x_{в}$)+КІБ(Н.1083)

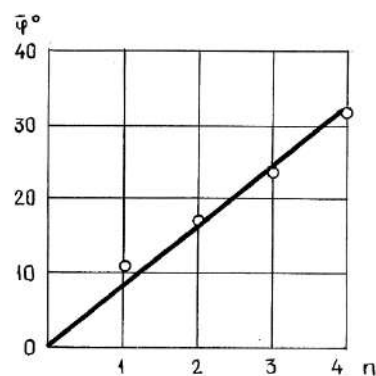


Рисунок 4.10 – Зміна кута пластичного вигину після: ВП+УЗЗ($\tau=10x_{в}$)+КІБ(Н.1083)

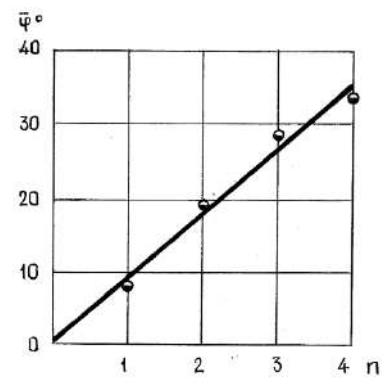


Рисунок 4.11 – Зміна кута пластичного вигину після: ВП + УЗЗ ($\tau= 10x_{в}$)

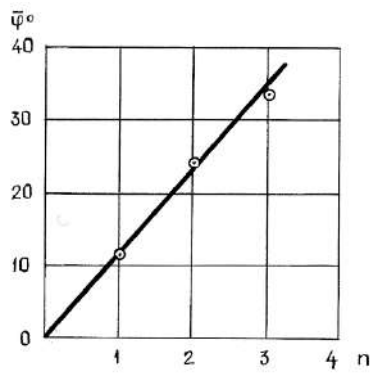


Рисунок 4.12 – Зміна кута пластичного вигину після: ВП + УЗЗ ($\tau=5\text{хв}$)

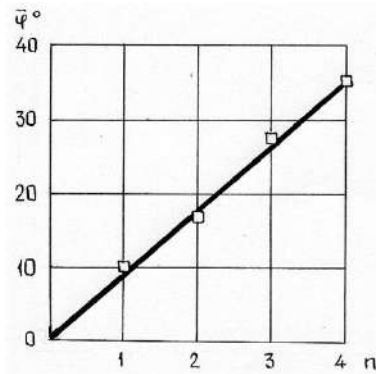


Рисунок 4.13 – Зміна кута пластичного вигину після: Н.1839 (без ВП) + КІБ

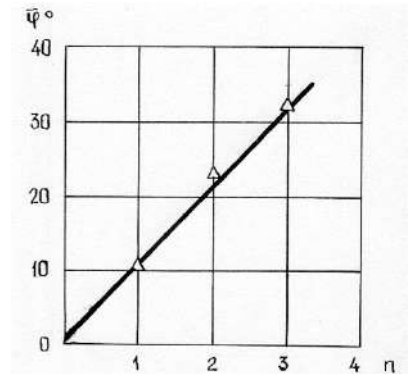


Рисунок 4.14 – Зміна кута пластичного вигину після: ВП КІБ + УЗЗ ($\tau=5\text{хв}$)

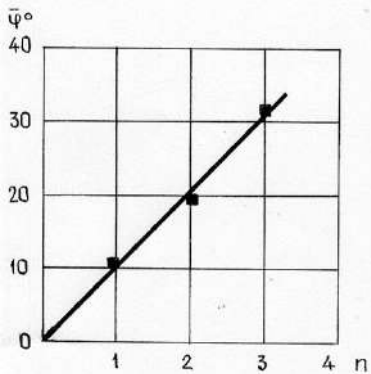


Рисунок 4.15 – Зміна кута пластичного вигину після: ВП (Н.936ч) + КІБ

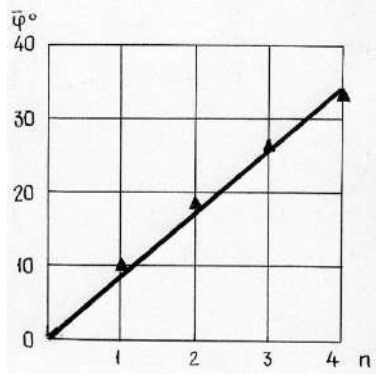


Рисунок 4.16 – Зміна кута пластичного вигину після: ВП + УЗЗ($\tau=5\text{хв}$) після випробувань на базі 100 МЛН. ЦИКЛ.

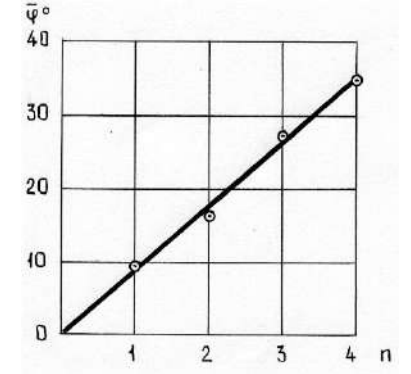


Рисунок 4.17 – Зміна кута пластичного вигину після: Н.1839(без ВП)+УЗЗ($\tau=5\text{хв}$) +КІБ

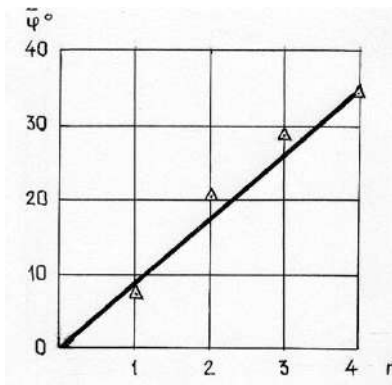


Рисунок 4.18 – Зміна кута пластичного вигину після: $ВП + \frac{1}{2}$ КІБ

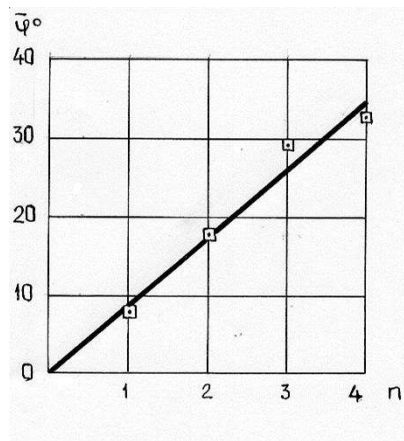


Рисунок 4.19 – Зміна кута пластичного вигину після: ВП (серійні)

Отримані результати ударних досліджень свідчать (табл. 4.13...4.16), що після всіх видів оздоблювально-зміцнювальної та комплексної обробки після другого (частина лопаток після третього) удару в нижньому перетині ($l = 20$ мм) частина лопаток пластично деформується, а частина – деформується з утворенням тріщини чи руйнується. Після першого удару лише одна лопатка отримала тріщину, що свідчить про зниження ударної міцності після ультразвукового зміцнення протягом 10 хв.

Слід зазначити, що найбільш міцними виявилися серійні лопатки та лопатки з КІБ та УЗЗ ($\tau = 5$ хв) з напрацюванням без відновного віброполірування – жодна лопатка не зруйнувалася після другого удару ($l = 20$ мм).

При цьому найбільший кут вигину ($\bar{\varphi}_1$, град = $6,17^{\circ} \dots 7,33^{\circ}$) після першого удару спостерігався у лопаток з покриттям TiN і з наступним ультразвуковим зміцненням. Ці лопатки виявилися більш пластичними, а менш пластичними виявилися лопатки після УЗЗ ($\tau = 10$ хв) та лопатки після випробувань на втому на базі 100 млн. цикл.

Інші результати отримані при ударних випробуваннях бойком у верхній переріз ($l = 30$ мм).

Характерно, що після другого удару руйнувалися лопатки (з'являлися тріщини), оброблені УЗЗ ($\tau = 10$ хв) з наступним напиленням TiN.

Можна зробити такі висновки:

- ультразвукове зміцнення протягом 10 хв знижує пластичність та опір лопаток ударним навантаженням;

- комплексна обробка УЗЗ ($\tau = 5$ хв) + КІБ не призводить до зниження ударної міцності лопаток.

Таблиця 4.13 – Результати ударних випробувань лопаток (l = 20 мм від піддошви хвостовика)

Метод обробки, режими та напрацювання (Н)	φ_1 , град.	φ_2 , град	φ_3 ,град	φ_4 ,град	Примітка
1	2	3	4	5	6
Серійні	6,5	10,5	15	-	д.р.
	6	9,5	14	17,5	
	6	11,5	19 тр	-	
Серійні + КІБ (верхня половина пера)	6,5	12	14	-	-
	6	12,5	-		
	7	тр 12	17,5 тр		
Н.1083.ВП+УЗЗ($\tau=5$ хв) + КІБ	5	7,5	10	17	д.р.
	4	7,5	9	д.р.	
	7	13,5 тр	-	-	
Н.1083.ВП+УЗЗ($\tau=10$ хв) = КІБ	6,5	16,5	-	-	д.р.
	6,5	10	14	18,5	
	11 тр	-	-	-	
Н.1000.ВП+УЗЗ($\tau=10$ хв)	5	12 тр	-	-	-
	5	9	д.р.	-	
	6,5	11,5	18 тр	-	

1	2	3	4	5	6
Н.936.УЗЗ($\tau=5$ хв)	6	д.р.	-	-	
	6,5	12	д.р.	д.р.	
	6	11	д.р.	д.р.	
Н.201/1839,без ВП+КІБ	6	10	д.р.		
	7	12,5	д.р.	-	
	6	11	д.р.		
КІБ+УЗЗ($\tau=5$ хв) Н.1547	7,5	13	д.р.		
	7,5	13	д.р.	-	
	7,0	12,5	д.р.		
Н.936.ВП+КІБ	6	12,5	-	-	
	7,5	тр	д.р.		
	7	11	17,5		
		12			
УЗЗ (5хв) після випробувань на втому на базі 100 млн. цикл.	5	9	14		
	5	10	14 тр.	-	
	5	19 тр.	-		
Без ВП.Н.201/1839. УЗЗ ($\tau=5$ хв) + КІБ	7,5	13	-	-	
	5	8	18	18 тр	
	7	11	д.р.	д.р.	

Примітка: тр. - Тріщина; д.р. - Повне руйнування.

Таблиця 4.14 – Статистична обробка результатів ударних випробувань лопаток (l = 20 мм від підошви хвостовика)

Метод обробки, режими напрацювання (Н)	$\bar{\varphi}_1$ град д	$\bar{\varphi}_2^*$ град д	$\bar{\varphi}_3^*$ град д	$\bar{\varphi}_4$ град д	$\bar{\varphi}_2^{Tp}$ град д	$\bar{\varphi}_3^{Tp}$ град д	$\bar{\varphi}_4^{Tp}$ град д	n_2^{Tp} %	n_3^{Tp} %
Серійні	6,1 7	10,5	14	17,5	-	17	-	-	-
Серійні КІБ, (верхня половина пера)	6,6 7	12		-		15,7 5	-	-	-
Н.1083.ВП+УЗЗ ($\tau=5xв$) + КІБ	5,7	7,5	9,5	13,5	13,5	-	-	33, 3	
Н.1083 ВП+УЗЗ($\tau=10xв$) + КІБ	6,5	10	14	18,5	16,5	-	-	33, 3	
Н.1000 ВП+УЗЗ($\tau=10xв$)	5,5	10,5			12	18	-	6,7	100
Н.936 УЗЗ ($\tau=5xв$)	6,1 7	11,5	16,5	-	-	-	-	33, 3	
Н.201/1839 (без ВП)+КІБ	6,3 3	11,7	-	-	-	-	-	-	100
Н.1547 КІБ = УЗЗ ($\tau=5xв$)	7,3 3	12,8 3	-	-	-	-	-	-	100
Н.936 ВП + КІБ	6,8 3	11,5	-	-	12,5	17,5	-	33, 3	66,7
Н.936 УЗЗ ($\tau=5xв$) - після випробувань на втому на базі 100 млн. циклів	5	9,5	14		19	14	-	33, 3	33,3
Н.201/1839 без ВП УЗЗ ($\tau=5xв$) + КІБ	6,5	10,7	13	-	-	18	-	-	33,3
Середнє значення результатів									

Примітка: $\bar{\varphi}_1$,град – кут пластичного вигину після першого удару,

$\bar{\varphi}_2^*$,град, $\bar{\varphi}_3^*$, град – кути пластичного вигину після другого і третього ударів без урахування зруйнованих лопаток з тріщинами, що утворилися.

$\bar{\varphi}_2^{Tp}$, град; $\bar{\varphi}_3^{Tp}$, град; $\bar{\varphi}_4^{Tp}$ град – кути пластичного вигину зруйнованих лопаток і лопаток з тріщинами, що утворилися.

n_2^{Tp} , % - відсоткове відношення зруйнованих лопаток та лопаток, що отримали тріщини, до всіх випробуваних лопаток після другого удару.

n_3^{Tp} , %- теж після третього удару.

Таблиця 4.15 – Результати ударних випробувань лопаток ($\ell=30$ мм від підошви хвостовика)

Метод обробки, режими напрацювання (Н)	φ_1 , град.	φ_2 ,град	φ_3 ,град	φ_4 ,град
1	2	3	4	5
Серійні	9	15	26	32закл
	9	17,5	34Тр	
	8,5	16,5	27Тр	
Серійні+КІБ (верхня половина пера)	10,5	19,5	27,5	34закл
	11	20,5	28,5	36закл
	12	23	32закл	-
Н.1083 ВП+УЗЗ($\tau=5$ хв) + КІБ	11	19	27,5	34закл
	12	21	29	36,5закл
	10	17,5	26	32закл
Н.1083 ВП+УЗЗ($\tau=10$ хв) + КІБ	10	16	26,5	36,5закл
	11,5	13,5Тр	-	-
	11	18,5	21,5	35,5закл
Н.1000 ВП+УЗЗ($\tau=10$ хв)	11	20	29закл	
	10	20Тр	29Тр	
	11	19	28	35,5закл
Н.936 УЗЗ($\tau=5$ хв)	12	24	31,5	
	11	21	31Тр	
	13	23	32закл	
Н.201/1839 без ВП+КІБ	10	18	26,5	33закл
	11	17	25	35закл
	12	16	26	32закл
Н.1547 КІБ+УЗЗ($\tau=5$ хв)	11	23	28Тр	-
	11	19	25	31закл
	10	18	24	32закл

1	2	3	4	5
Н.936 ВП+КІБ	10	18	32,5Тр	
	12	21	30закл	
	11	19	32Тр	
УЗЗ ($\tau= 5\text{хв}$) після випробувань на втому на базі 100 млн. цикл.	10	18	27	32,5закл
	10	18	П.р.	-
	11	19	28	33закл
Без ВП Н.201/1839 УЗЗ($\tau= 5\text{хв}$) + КІБ	10	18	26	32,5закл
	9	16	28Тр	-
	10	19	27,5	38закл

Примітка: тр – тріщина; П.р. - Повне руйнування; закл - заклинювання.

Таблиця 4.16 – Статистична обробка результатів ударних випробувань ($l = 30$ мм від підошви хвостовика)

Метод обробки, режими напрацювання (Н)	ϕ_1 , град.	ϕ_2 ,град	ϕ_3 ,град	ϕ_4 ,град
1	2	3	4	5
Серійні	8,83	16,33	29	32
Серійні + КІБ (верхня половина пера)	11,17	21	29,33	35
Н.1083 ВП+УЗЗ ($\tau= 5 \text{ хв}$) + КІБ	11	19,17	27,5	34
Н.1083 ВП+УЗЗ ($\tau= 10\text{хв}$) + КІБ	10,83	16	24	36
Н.1000 ВП+УЗЗ ($\tau= 10\text{хв}$)	10,7	19,7	28,7	33,5
Н.936 УЗЗ ($\tau= 5\text{хв}$)	12	22,3	31,5	-
Н.201/1839 без ВП+КІБ	11	17	25,83	33,33
Н.1547 КІБ+УЗЗ ($\tau= 5\text{хв}$)	10,67	20	25,7	31,5
Н.936 ВП+КІБ	11	19,33	31,5	-

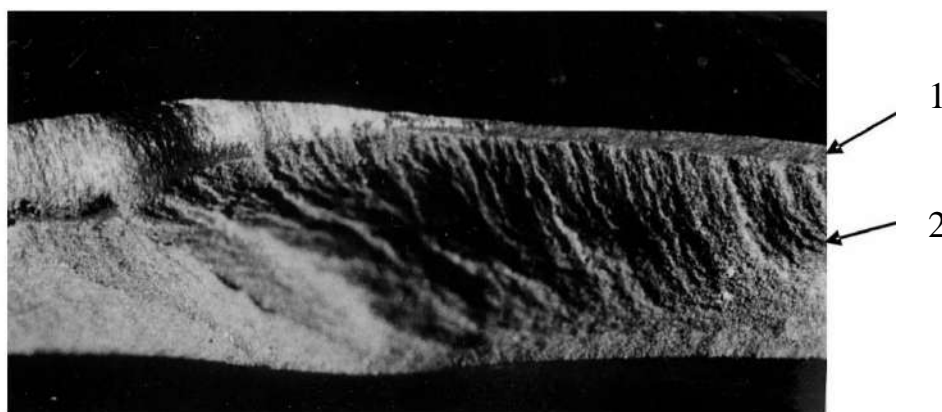
1	2	3	4	5
УЗЗ ($\tau=5$ мин) після випробувань на втому з урахуванням 100 хв, цикл.	10,33	18,33	27,5	32,75
Без ВП Н.201/1839УЗЗ т($\tau=5$ хв) + КІБ	9,67	17,7	27	35,25

Примітка: $\varphi_1, \text{град} \dots \varphi_4 \text{град}$ – середні значення кутів вигину розраховані по цілих лопатках і з тріщинами.

Об'єктом дослідження служили злами зміцнених за різними варіантами лопатки після руйнування під впливом багаторазового ударного навантаження.

Злами досліджувалися з допомогою мікроскопа МБС-10 зі збільшенням 6 – 90. Фотографування макрозломів здійснювалося 35-мм фотокамерою, оснащеною спеціальною приставкою для макросъемки.

Вивчення зламів зруйнованих лопаток показало, що макрозломи склалися з двох зон: зони з радіальними рубцями і зони долому, що має вигляд тонкої малорельєфної смуги, що повторює обриси перерізу лопатки з боку спинки (рис. 4.20).



1 – зона долому, 2 – зона радіальних рубців

Рисунок 4.20 – Характерні зони макрозламів лопатки (Н.936, УЗЗ (5))



У33 (5 хв) + КІБ



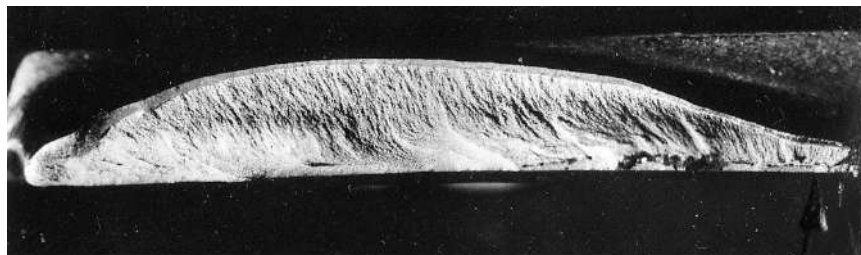
КІБ + У33 (5 хв)



Н.1839, без ВП+КІБ



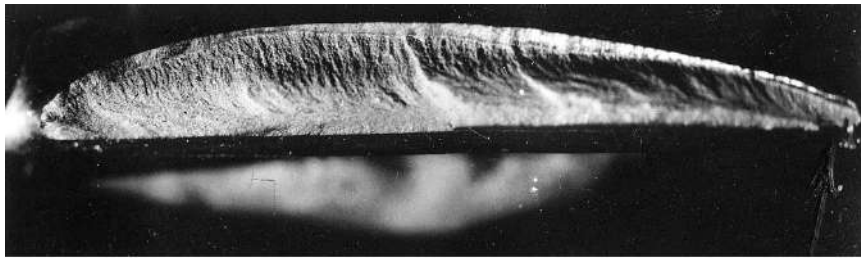
КІБ+У33 (5 хв)



ВП + У33 (10 хв)



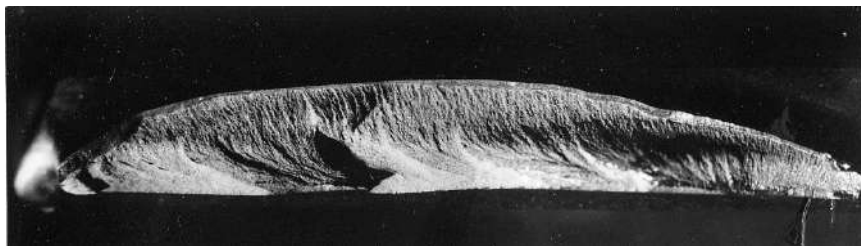
ВП + УЗЗ (10 хв) + КІБ



без ВП + КІБ (Н. 1839)



УЗЗ (5 хв) + КІБ без ОП



Н. 936 УЗЗ (5 хв)

Рисунок 4.21 – Макрозломи лопаток. Стрілки вказують вогнища руйнування

Відомо, що радіальні рубці на поверхні зламу розташовуються в напрямку перпендикулярному фронту поширення тріщини. Тому центр чи осередок руйнування можна визначити продовженням радіальних рубців до їхнього перетину. Визначені за вказаною методикою вогнища руйнування знаходилися для всіх досліджених лопаток поблизу вузького краю лопатки з боку корита (рис. 4.21).

Наявність вогнища руйнування у вищезгаданій зоні підтверджується конфігурацією тріщин у лопатках, зруйнованих до кінця (без поділу дві частини (рис. 4.22).

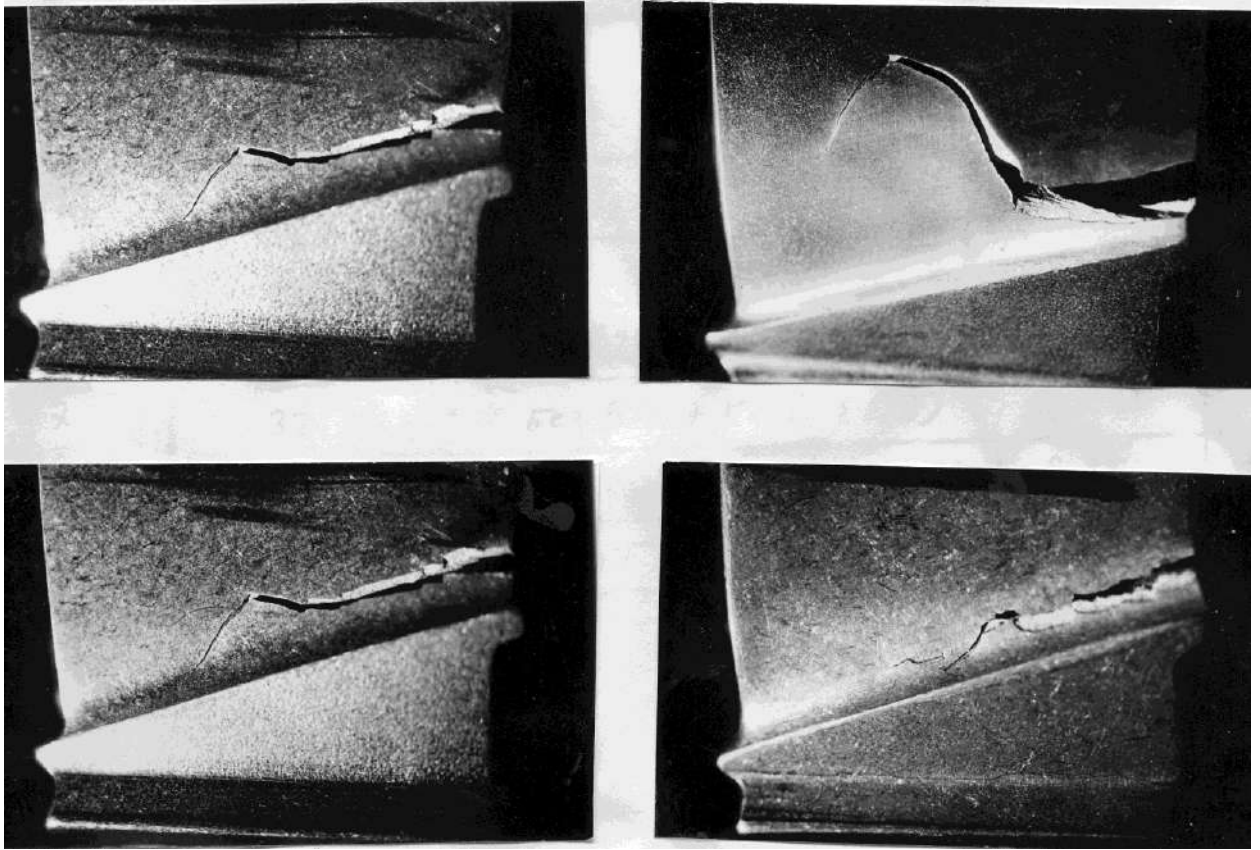


Рисунок 4.22 – Тріщини у лопатках після ударного навантаження

На мікроскопі МБС-10 за допомогою певної шкали (ціна поділу 0,05 мм) була виміряна ширина зони долому в зламах, зміцнених за різними варіантами. Вимірювалася максимальна та мінімальна товщина, результати вимірювань наведені у таблиці 4.17.

Таблиця 4.17 – Ширина зони долому у зламі лопаток

№п/п	Метод зміцнення	Ширина зони долому, мм	
		min	max
1	УЗЗ (5 хв)+КІБ	0,25	0,40
2	КІБ + УЗЗ (5 хв)	0,45	1,00
3	Н.1839, без ВП+КІБ	0,25	0,50
4	КІБ+УЗЗ(5 хв)	0,15	0,40
5	ВП+УЗЗ (10 хв)	0,15	0,30
6	ВП+УЗЗ (10 хв) + КІБ	0,20	0,45
7	Н.1839 без ВП+КІБ	0,20	0,50
8	УЗЗ (5 хв)+КІБ,без ВП(Н201/1839)	0,15	0,50
9	Н.936 УЗЗ(5 хв)	0,10	0,40

4.4 Висновки

4.1 Визначено напружено-деформований стан лопатки з концентраторами напружень у вигляді напівсфери на вхідній кромці в різних перерізах при коливаннях по першій згинальній формі розрахунковим методом кінцевих елементів за допомогою препроцесора ANSYS.

Встановлено, що величина максимальних напружень за наявності пошкоджень на вхідній кромці ($R=0,25; 0,5$ та $1,0$ мм) у перерізах до 43 мм від підосви хвостовика приблизно вдвічі вище, ніж у серійній (початковій) лопатці.

Величина максимальних напружень не залежить від розміру пошкоджень у межах $R=0,25...1,0$ мм та кількості пошкоджень (від 1 до 3-х на лопатці), розташованих на вхідній кромці на відстані від 27 до 57мм від підосви

4.2 Випробування на ударну міцність лопаток показали, що після всіх видів оздоблювально-зміцнювальної та комплексної обробки після другого, а частина лопаток після третього удару в нижній перетин ($L=20$ мм) пластично деформується, а частина деформується з утворенням тріщини або руйнується.

Найбільш міцними та пластичними виявилися серійні лопатки та лопатки з УЗЗ(5хв) + КІБ – жодна лопатка не зруйнувалася після другого удару ($L = 20$ мм).

Найменш пластичними та міцними виявилися лопатки після УЗЗ(10хв) та КІБ+УЗЗ(10хв) – на лопатках після першого удару утворилася тріщина ($L = 20\text{мм}$).

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. В дипломній роботі одержано рішення наукової проблеми – підвищення несучої здатності, ерозійної стійкості, параметрів витривалості та стійкість до удару лопаток компресора на вертолітних двигунах з титанових сплавів, яке полягає у формуванні методів оброблення з нанесенням покриття.

2. Виконано комплексні дослідження напружено-деформованого стану лопатки з пошкодженнями у вигляді витоків на вхідній кромці у різних перерізах при коливаннях за першою згинальною формою за допомогою метода кінцевих елементів в програмі ANSYS.

Виявлено, що величина максимальних напружень не може залежить від кількості пошкоджень (від одного до трьох з радіусом $R=0,25...1,0\text{мм}$) на вхідній кромці в перерізах на відстані від 27 до 57мм від низу хвостовика і приблизно вдвічі вище, ніж у серійній (без пошкоджень) лопатці, які призводить до зниження витривалості.

3. Дослідження поверхні лопаток показали, що зміцнення лопатки в певній послідовності формує залишкові стискаючі напруження доволі високого рівня, а саме 720 МПа.

Встановлено зменшення рівня стискаючих напружень у верхній частині пера та на тонких кромках та лопатки порівняно з прикомльовою ділянкою.

4. Комплексна обробка призводить до значного підвищення опору втомі: Наприклад витривалість зростає на 7 відсотків. При цьому якщо урахувати параметри розсіювання витривалість зростає на 15%.

5. Випробування на стійкість до удару довели, що найбільш міцними та пластичними виявилися серійні лопатки та лопатки після комплексної обробки (УЗЗ+КІБ) – жодна лопатка не зруйнувалася після другого удару ($L=20\text{мм}$).

6. Зміна технології формування поверхневого шару лопаток компресора які виготовлюються з титанових сплавів дозволить, підвищити ресурс вертолітних

двигунів ТВЗ-117 та ТВЗ-117 ВМА-СБМ1. Очікуваний економічний ефект зіставить 192 тис.грн.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Отделочно-упрочняющая обработка деталей ГТД. Богуслаев В.А., Яценко В.К., Жеманюк П.Д., Пухальская Г.В., Павленко Д.В., Бень В.П. – Запорожье. Изд-во ОАО «Мотор Сич», 2005. – 558 с.
2. Трощенко В.Т., Грязнов Б.А., Налимов Ю.С. Влияние технологических и эксплуатационных факторов на сопротивление усталости и живучести рабочих лопаток ГТД // Вібрації в техніці та технологіях, 2001, – № 5 (21). – С. 2–6.
3. Трощенко В.Т., Хамаза Л.А., Покровский В.В. и др. Циклические деформации и усталость металлов. Т. 2. Долговечность металлов с учетом эксплуатационных и технологических факторов. – К.: Наук. думка, 1985. – 222 с.
4. Трощенко В.Т., Матвеев В.В., Грязнов Б.А. и др. Несущая способность рабочих лопаток ГТД при вибрационных нагружениях. – К.: Наук. думка, 1981. – 312 с.
5. Трощенко В.Т., Покровский В.В., Прокопенко А.В. Трещиностойкость металлов при циклическом нагружении. – К.: Наукова думка, 1987. – 238 с.
6. Електронний ресурс [режим доступу <https://visnyk.tntu.edu.ua/index.php?art=159>].
7. Прокопенко А.В., Черныш О.Н. Развитие коротких поверхностных усталостных трещин в стали 20Х13 и сплаве ВТ9 // Пробл. прочности, 1989. – № 5. – С. 12–16.
8. Ляшенко Б.А. Несущая способность материалов и конструктивных элементов с защитными покрытиями в экстремальных условиях эксплуатации: Автореф. дис-и докт. техн. наук. – Киев, 1976. – 55 с.
9. Трощенко В.Т., Сосновский Л.В. Сопротивление усталости металлов и сплавов. Справочник. Часть 1. – К.: Наук. думка, 1987. – 505 с.

10. Электронный ресурс [режим доступа https://ftfsite.ru/wp-content/files/landau_tf7_teoruprug_3.2]

11. Жуков В.Б., Пухальская Г.В. Влияние упрочнения на ударную прочность лопаток компрессора // Придніпровський науковий вісник, 1998. – № 115(182). – С. 33–43.

12. Влияние остаточных напряжений на сопротивление усталости упрочненной детали. Павлов В.Ф., Бордаков С.А., Вакулук В.С., Кольцун Ю.И., Сургубанова Ю.Н. // Вибрации в технике и технологиях, 2001. – № 5(21). – С.16-20.

13. Жуков В.Б., Бень В.П., Яценко В.К. Влияние деформационного упрочнения на ударную прочность лопаток компрессора // Технологические системы, 2003 – № 1. – С. 36-41.

14. Электронный ресурс [режим доступа <https://search.rsl.ru/ru/record/01007468805>].

15. Гонtareва Р.Г., Полоскин Ю.В., Родкина Л.Е. и др. Характер остаточных напряжений в приповерхностных слоях сплавов ВТЗ-1 и ВТ22 после дробеструйного поверхностного пластического деформирования // Пробл. прочности, 1982. – № 3. – С. 107–108.

16. Антонюк А.С., Сорока Е.Б., Калиниченко В.И. Остаточные напряжения в вакуум-плазменных покрытиях // Вібрації в техніці та технологіях, 2004. – № 5(37). – С. 88-89.

17. Электронный ресурс [режим доступа <https://obuchalka.org/20220805146371/fizika-poverhnosti-zenguil-e-1990.html>].

18. Электронный ресурс [режим доступа <http://www.tnu.in.ua/study/books/entry-1053765.html>].

19. О возможностях определения степени деформации металла методом электронно-фотонной эмиссии. Антонов В.Н., Кобзарь Ю.М., Красовский Е.Е., Шаталов В.М. // ФХММ, 1988. 24. – № 5. – С. 112–114.

20. Пашаев Э.А., Абдулаев М. Выход оже-электронов в условиях дифракции рентгеновских лучей //Кристаллография, 1989. – 34. – № 1. – С. 263–265.

21. Повышение выносливости лопаток компрессора. Богуслаев В.А., Рубель О.В., Сахнюк Н.В., Пухальская Г.В., Лоскутов С.В. // Технологические системы, 2002. – №3 (4). – С. 65–70.

22. Писарев В.Д. Методы контроля остаточных напряжений // Технология легких сплавов, 1983. – № 5. – С. 73–78.

23. Еремин Ю.А., Клебанов Я.М., Кокоров И.А. и др. Влияние циклической тренировки на механические характеристики сплавов ВТ3-1 и ВТ22 // Пробл. прочности, 1981. – № 1. – С. 82–85.

24. Белозеров В.В., Белозерова В.В., Махатилова А.И. Фактор остаточных напряжений в усталостной прочности высокопрочных сталей. / Сб. докладов 2-го Международного симпозиума “Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов в машиностроении”. Часть 1, 2001. – С. 144–148.

25. Технологическое обеспечение несущей способности лопаток компрессора. Богуслаев В.А., Жеманюк П.Д., Яценко В.К., Пухальская Г.В. // Вестник двигателестроения, 2004. – №4. – С. 8–13.

26. Формирование характеристик поверхностного слоя лопаток компрессора комплексной обработкой. Богуслаев В.А., Жеманюк П.Д., Яценко В.К., Бень В.П., Лоскутов С.В. // Вестник двигателестроения, 2003. – № 1. – С. 41–46.

27. Повышение несущей способности лопаток компрессора комплексной обработкой. Богуслаев В.А., Жеманюк П.Д., Яценко В.К., Бень В.П. // Вестник двигателестроения, 2004. – № 1. – С. 81–85.

28. Богуслаев В.А., Яценко В.К., Гармаш А.В. Пневмодробеструйное упрочнение лопаток ГТД // Пробл. прочности, 1995. – № 8. – С. 91 – 94.

29. Влияние комплексной магнито-абразивной обработки и композиционных покрытий на характеристики усталости рабочих лопаток ГТД. Грязнов Б.А., Майборода В.С., Налимов Ю.С., Билык И.И., Герасимчук О.М. // Вибрации в технике и технологиях, 2001. – №3 (21). – С. 80–83.

30. Повышение выносливости лопаток компрессора с диффузионными покрытиями. Богуслаев В.А., Яценко В.К., Бень В.П., Орлов М.Р. // Сб. докладов 4-й Межд. конференции "Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов", Харьков, 2003. – С. 122-124.

31. Формирование характеристик поверхностного слоя пера лопаток компрессора комплексной обработкой. Богуслаев В.А., Яценко В.К., Жеманюк П.Д., Бень В.П., Орлов М.Р. // Вестник двигателестроения, 2005. – № 1. – С. 18–22.

32. Об упрочняющей роли вакуум-плазменных покрытий. Рутковский А.В., Ляшенко Б.А., Гопкало А.П., Сорока Е.Б. // Пробл. прочности, 1999. – № 6. – С. 123–126.

33. О снижении остаточных напряжений в вакуум-плазменных покрытиях. Ляшенко Б.А., Рутковский А.В., Сорока Е.Б., Липинская Н.В. // Пробл. прочности, 2001. – № 4. – С. 62–68.

34. Технический отчет № 2.3. 86.78.093 по результатам усталостных испытаний рабочих лопаток компрессора изделия «78» с покрытием на основе нитрида титана и серийных. – ЗПОМ, 1986.

35. Матвеев Н.В., Краснов А.Н., Милосердов И.В. и др. Остаточные напряжения в покрытии из нитрида титана, осажденного в вакууме // Пробл. прочности, 1985. – № 5. – С. 90-93.

36. Электронный ресурс [режим доступа https://books.google.com.ua/books/about/Физика_прочности_и_пл.html?id=Q_E0AAААІААА&redir_esc=y].

37. Поверхностное упрочнение лопаток газотурбинных двигателей в ультразвуковом поле. Яценко В.К., Стебельков И.А., Притченко В.Ф., Михайлов С.Б., Кичаев Ю.П. // Пробл. прочности, 1985. – № 8. – С. 68–72.

38. Особливості деформаційного зміцнення лопаток компресора. Богуслаєв В.О., Пухальська Г.В., Рубель О.В., Левітін В.В. // Металознавство та обробка металів, 2000. – № 3. – С. 62–64.

39. Ударная прочность лопаток ГТД. Яценко В.К., Михайлов С.Б., Притченко В.Ф. и др. // Пробл. прочности, 1989. – № 10. – С. 113–116.

40. А.с. 1124187 СССР, G01 M7/00. Установка для динамических испытаний образцов материалов и деталей машин. Михайлов С.Б., Михайлов Б.Г., Яценко В.К., Притченко В.Ф. // Открытия. Изобретения, 1984. – № 42. – С. 124–125.

41. Дробеструйное упрочнение лопаток компрессора ГТД.. Богуслаев В.А., Ткаченко В.В., Пухальская Г.В. и др. // Технологические системы, 2001. – № 3(9). – С. 39–42.

42. Богуслаев В.А., Пухальская Г.В., Рубель О.В. Технологические ресурсы повышения выносливости лопаток компрессора ГТД./ Сб. научн. трудов. Авиационная космическая техника и технология. Вып. 9. Тепловые двигатели и установки. Харьков, 1999. – С. 341–345.

43. Электронный ресурс [режим доступа https://www.studmed.ru/balter-ma-uprochnenie-detaley-mashin_96cf0a0b232.html].

44. Циклическая прочность титановых сплавов с покрытиями при нормальных и повышенных температурах в условиях высокой частоты нагружения. Трапезон А.Г., Мироненко В.И., Бондарь А.В., Вальков А.С. // Вібрації в техніці та технологіях, 2004. – № 5(37). – С. 85-87.

45. Повышение ресурса авиационных двигателей из титановых сплавов при помощи вакуум-плазменных покрытий. Б.А. Ляшенко, А.Г. Трапезон, К.Г. Орват, А.В. Рутковский // Тр. конференции. Оценка и обоснование продления ресурса элементов конструкций. Том 2. – Киев, 2000. – С. 825–830.

46. Дополнение к техническому отчету №ТК.078.89.374.ОН по исследованию изделий «78МТ», имевших противэрозионное покрытие «нитрид титана» на рабочих лопатках компрессора, и эксплуатировавшихся в паре с ними серийных изделий, поступивших для сравнительной оценки после эксплуатации объекта «80МТ» в пыльных условиях. – ЗПОМ, 1990.

47. Техническая справка № ОК.078.242.90.ОН по результатам эксплуатационной проверки рабочих лопаток компрессора, покрытых “нитридом титана”. – ЗПОМ, 1990.

48. Техническая справка №2.783.010.96 ИЦ. Результаты усталостных испытаний лопаток 1, 6, 12 ст. компрессора и 5, 8ст. на изд. «78» Шсер., изготовленных по паспорту № 78-2597-95.-ОАО «Мотор Сич», 1996.

49. Технический отчет № ОК.078.113.90.ОН по результатам стендовых испытаний изделия 78МТ743237, компрессор которого укомплектован рабочими лопатками, покрытыми «нитридом титана» (TiN). – ЗПОМ, 1990.

50. Богуслаев В.А., Бень В.П., Яценко В.К., Каплун В.Г., Рубель О.В. Восстановление несущей способности лопаток компрессора технологическими методами. // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні, 2003. – № 1. – С. 72–76.

51. Богуслаев В.А., Муравченко Ф.М., Жеманюк П.Д. и др. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей // Лопатки компрессора и вентилятора. Часть 1. – Запорожье, изд. ОАО «Мотор Сич», 2003. – 396 с.

52. Технический отчет № 2.3.86.78.093 по результатам усталостных испытаний рабочих лопаток компрессора изделия “78” с покрытием на основе нитрида титана и серийных. – ЗПОМ, 1986.

53. Корневский Е.Я., Яценко В.К. Восстановление рабочих лопаток компрессоров виброгалтовкой // Самолетостроение и техника воздушного флота. Сб. научн. тр. ХАИ, 1970. – № 22. – С. 121–126.

54. Евстигнеев М.И., Сулима А.М., Федоров Л.А. О влиянии ультразвуковой обработки на усталостную прочность лопаток ГТД // Пробл. прочности, 1980. – № 5. – С. 34–36.

55. Богуслаев В.А., Яценко В.К., Притченко В.Ф. Технологическое обеспечение и прогнозирование несущей способности деталей ГТД // Изд. фирма “Манускрипт”, Киев, 1993. – 332 с.

56. Электронный ресурс [режим доступа <https://lib-bkm.ru/11346>].

57. А. с. 1675689 СССР, кл G01L1/00. Способ определения остаточных напряжений в полосовых заготовках / Г. Л. Колмогоров. – Опубл. 19.10.88, Бюл. № 33.

58. Рудницкий Н.М. К оценке влияния остаточных напряжений и упрочнения поверхностного слоя на усталостную прочность деталей // Пробл. прочности, 1981. – №10. – С. 27–34.

59. Электронный ресурс [https://www.studmed.ru/heyvud-r-b-proektirovanie-s-uchetom-ustalosti_e98d70d0fbf.html].