



УКРАЇНА
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

(ЗНТУ)
РЕЦЕНЗІЯ

на дипломний проект (роботу) дослідження впливу робочого
 (вказати тему дипломного проекту (роботи))
середовища на працездатність робочих коротких стержнів
лоток ГТК-101

Студент Синдрінова Александра Андріївна

Спеціальність 131 Преміальна механіка група МЗ - 1+3М

Обсяг проекту (роботи) Повний

Кількість аркушів креслення

Кількість сторінок пояснювальної записки 55

а) короткий зміст проекту (роботи) та прийнятих рішень

Виконано роботу з дослідження впливу робочого середовища на працездатність робочих коротких стержнів лоток ГТК-101 після направлення 15 тис. год.

дослідження механічних властивостей робочих лоток ГТК-101 після направлення 15 тис. год.

Проведено оцінку високотемпературної корозійної стійкості досліджуваних лоток. Виконано оцінку механічних властивостей досліджуваних сталей.

б) висновок про відповідність проекту (роботи) завданню

Виконана робота повністю відповідає поставленому завданню

в) характеристика виконання кожного розділу дипломного проекту (роботи), рівень відповідності останнім досягненням науки та техніки і передовим методам роботи

Виконана робота на достатньому рівні відповідає останнім досягненням науки та техніки

г) негативні особливості виконання проекту (роботи)

При перевірці виконаної роботи негативних особливостей не виявлено.

д) позитивні особливості новий підхід у дослідженні впливу робочого середовища на продуктивність робочих процесів на лінії ГТК-10 І

е) оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки до проекту (роботи) графічний матеріал (презентація) на достатньому рівні, пояснювальна записка виконана з порушеннями норм оформлення магістерських робіт затверджених на кафедрі.

є) відгук про роботу загалом В цілому магістерська робота студентки групи МЗ-113М Смиродімової Александри Андріївни відповідає високому рівню виконання.

ж) інші зауваження На деяких рисунках забарвлена сім'я копії ГТН-16, аніж то, що забарвлена у темні ГТК-10 І

з) оцінка проекту (роботи) В цілому магістерська робота студентки МЗ-113М Смиродімової Александри Андріївни заслуговує оцінку "добре".

/ Рецензію склав доцент Кондратюк Е.В.
(посада, місце роботи, прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

« 10 » травня 20 18 р.

[14:18:55] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №112 [2] (200054 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло)

[14:19:05] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №117 [2] (200054 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло)

[14:19:20] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №122 [2] (200054 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло)

[14:19:35] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №127 [2] (200054 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло)

[14:19:51] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №132 [2] (200054 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло)

[14:20:04] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №137 [2] (200054 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло)

[14:21:16] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №142 [2] (200054 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло)

[14:23:36] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №147 [2] (200054 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло)

[14:23:54] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №152 [2] (200054 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло)

[14:24:13] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №157 [2] (200054 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло)

[14:24:30] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №162 [2] (200054 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло)

[14:24:50] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №167 [2] (200054 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло)

[14:24:51] Тип проверки: *Стандартная*

[14:24:51] **ВНИМАНИЕ! Уникальность может быть определена некорректно! (Обнаружено ошибок: 27%)**

[14:24:51] **Уникальность текста 95%**[©] (Проигнорировано подстановок: 0%)

Перевірку на плагіат програмою AntiPlagiarism.NET, магістерської роботи Смородінова О.А., провів зав. лаб. каф. ТМБ Паміров В.М.

06.12.2018р.



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Машинобудівний

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Технології машинобудування

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)

другий (магістерський)

ступінь вищої освіти(освітній ступінь)

на тему Дослідження впливу робочого середовища на працездатність
робочих порожнистих лопаток ГТК-10І

Виконав: студент 6 курсу, групи Мз-113м
напряму підготовки (спеціальності)

131 «Прикладна механіка»

(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

Смородінова О.А.

(прізвище та ініціали)

Керівник Кононов В.В.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Кондратюк Е.В.

(прізвище та ініціали)

Запоріжжя
2018 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Запорізький національний технічний університет

Інститут, факультет _____ Машинобудівний _____
Кафедра _____ Технологій машинобудування _____
Ступінь вищої освіти (освітній ступінь) Другий (магістерський) _____
Спеціальність 131 «Прикладна механіка» _____
(шифр і назва)
Напрямок підготовки _____
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач

кафедри ТМБ _____

С.І. Дядя _____

“ ____ ” _____ 2018 року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТУ

Смородінова Олександра Андріївна _____

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Дослідження впливу робочого середовища на працездатність робочих порожнистих лопаток ГТК-10І

Керівник проекту (роботи) Кононов В.В., к.т.н., доцент _____,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “26” 11 2018 р. № 372

Строк подання студентом проекту

(роботи) _____ грудень _____

3. Вихідні дані до проекту (роботи) 1. Робочі лопатки _____

2. Програма досліджень _____

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Мета і завдання дослідження . 2. Матеріал і методика дослідження . 3. Дослідження натурних робочих порожнистих лопаток ГТК-10І. 3.1 Дослідження стану поверхні робочих лопаток після напрацювання 15 тис. годин. 3.2. Тонкі дослідження стану поверхонь. 3.3 Корозійна стійкість в розплавах солей. 3.4 Дослідження механічних властивостей робочих лопаток ГТК-10І після напрацювання більш 15 тис. годин 4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.

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

Презентація

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Науково-дослідний	Кононов В.В., доцент		
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Шмирко В.І., доцент		
Нормоконтроль	Логомінов В.О., доцент		

7. Дата видачі завдання 17 січня 2018

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1.	<i>Вивчення матеріалу та методик дослідження</i>	12.02.2018	
2.	<i>Виготовлення зразків для випробувань</i>	15.04.2018	
3.	<i>Випробування механічних властивостей</i>	20.08.2018	
4.	<i>Вивчення структурних перетворень</i>	25.09.2018	
5.	<i>Аналіз отриманих результатів</i>	17.10.2018	
6.	<i>Вивчення пошкоджень поверхонь лопаток</i>	06.11.2018	
7.	<i>Оформлення документації</i>	13.11.2018	
8.	<i>Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях</i>	02.12.2018	
9.	<i>Захист роботи</i>	12.12.2018	

Студент _____ Смородінова О.А.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи) _____ Кононов В.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

ПЗ: стор., табл., рис., 22 джерела.

Об'єкт дослідження – робочі лопатки турбіни високого тиску ГТК-10І.

Метою роботи є дослідження впливу робочого середовища на працездатність робочих порожнистих лопаток ГТК-10І.

Методи дослідження - металографічний, мікрорентгеноспектральний. Порівняльні короточасні і тривалі випробування механічних властивостей до і після експлуатації.

В ході роботи показано, що робоче середовище суттєво впливає на працездатність робочих порожнистих лопаток ГТК-10І, показано, які хімічні елементи зменшують ресурс експлуатації робочих лопаток в декілька разів.

Встановлено, що зовнішній шар профільної частини не показав глибоких пошкоджень за рахунок їх уносу швидкісним газовим потоком. Встановлено, що в пошкодженному шару містяться сульфіди типу TiS та Ti_2S_3 .

ЖАРОМІЦНИЙ СПЛАВ, ТЕРМІЧНА ОБРОБКА, МІКРОСТРУКТУРА, МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ, ДОВГОВІЧНІСТЬ, СТРУКТУРНА СТАБІЛЬНІСТЬ, СКЛАД ФАЗ.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень та термінів.....	
Вступ	
1 Аналіз літературних джерел.....	
Висновки.....	
2 Матеріали і методика дослідження	
2.1 Матеріали дослідження	
2.2 Металографічні дослідження.....	
2.3 Оцінка механічних властивостей сплавів.....	
2.4 Оцінка високотемпературної корозійної стійкості.....	
Висновки.....	
3 Дослідження натурних робочих порожнистих лопаток ГТК-10І.....	
3.1 Аналіз стану поверхні робочих лопаток після напрацювання 15 тис. год.....	
3.2 Тонкі дослідження стану поверхонь.....	
3.3 Корозійна стійкість в розплавах солей.....	
3.4 Дослідження механічних властивостей робочих лопаток ГТК-10І після напрацювання більш 15 тис. годин.....	
Висновки.....	
4 Охорона праці і безпека в надзвичайних ситуаціях	
Загальні висновки	
Перелік посилань.....	

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ

ВТК – високотемпературна корозія
ГОСТ – Державний стандарт
ГТК – газотурбінний компресор
ГТУ – газотурбінна установка
ГПА - газоперекачуючі агрегати
ЖНС- жароміцний нікелевий сплав
ЗПк – захисні покриття
ЗМІ – Запорізький машинобудівний інститут
ЄП-Пк – електронно-проміневе покриття
КВМ – коефіцієнт використання матеріалу
МРСА – мікрорентгеноспектральний аналіз
СНД – союз незалежних держав
СНиП – система норм та правил
ТВТ – турбіна високого тиску
ТМБ – технологія машинобудування
ТО – термічна обробка
ТП – технологічний процес
Пк – покриття
ЦКТІ – центральний конструкторсько-технологічний інститут
ХТО – хіміко-термічна обробка

ВСТУП

Актуальність теми. Газопроводи України більш ніж на 80% застосовують імпортні газоперекачуючі установки ГТК-10І та ГТК-25І виробництва фірми «General Electric». Підвищення техніко-економічних характеристик сучасних газотурбінних установок (ГТУ), їх експлуатаційна надійність та ресурс пов'язані з надійністю найбільш тяжконавантажених деталей, насамперед, робочих лопаток ГТУ.

Один з видів пошкоджень лопаток, які знижують експлуатаційну надійність ГТУ є корозійний вплив продуктів згоряння газотурбінного палива.

Останнім часом для виготовлення лопаток газових турбін, які працюють в умовах високих температур і напружень в агресивних середовищах, застосовують жароміцні нікелеві сплави з високими фізико-механічними властивостями, стабільністю структури при робочих температурах [1-6].

Проте при тривалому напрацюванні в умовах окисульфідній корозії відбувається зниження службових властивостей металу, що призводить до обмеження їх ресурсу експлуатації.

Підвищення корозійної стійкості лопаток може бути отримане різними засобами, що включають вдосконаленням хімічного складу сплавів, застосуванням захисних покриттів, здійсненням конструкторських і експлуатаційних заходів тощо.

Мета і завдання дослідження. Основною метою роботи було дослідження впливу робочого середовища на працездатність робочих порожнистих лопаток ГТК-10І.

Для досягнення цілі необхідно було вирішити наступні задачі:

- дослідити особливості корозійного пошкодження порожнистих робочих лопаток газових турбін ГТК-10І ;
- систематизувати методику аналізу, враховуючи двостороннє корозійне пошкодження деталей гарячої частини ГТУ;

- провести дослідження пошкоджень натурних лопаток та зразків після корозійного впливу;
- надати рекомендації щодо підвищення працездатності робочих порожнистих лопаток.

1 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

Конструктивні елементи газотурбінних установок (ГТУ) в процесі експлуатації схильні до, як правило, дії декількох видів навантажень, кожен з яких викликає характерний йому вид ушкодження. Так, на робочі і напрямні лопатки ГТД і ГТУ діють напруги, що визначаються комплексом статичних, вібраційних і циклічних (в загальному випадку) температурних навантажень.

Наприклад, на профільну частину робочої лопатки турбіни в сталому робочому режимі діють статичні напруги від відцентрових і газових сил, що досягають 200 МПа [1, 2]. Внаслідок температурного градієнта, усталеного в перетинах лопатки, в матеріалі виникають термічні напруги статичного характеру.

Одночасно матеріал лопатки схильний до дії високочастотних циклічних напружень, обумовлених вібрацією лопаток. Рівень цих напружень визначається конструктивними та експлуатаційними чинниками і може становити 100 МПа, а сумарні (еквівалентні) - 150 МПа [1, 2].

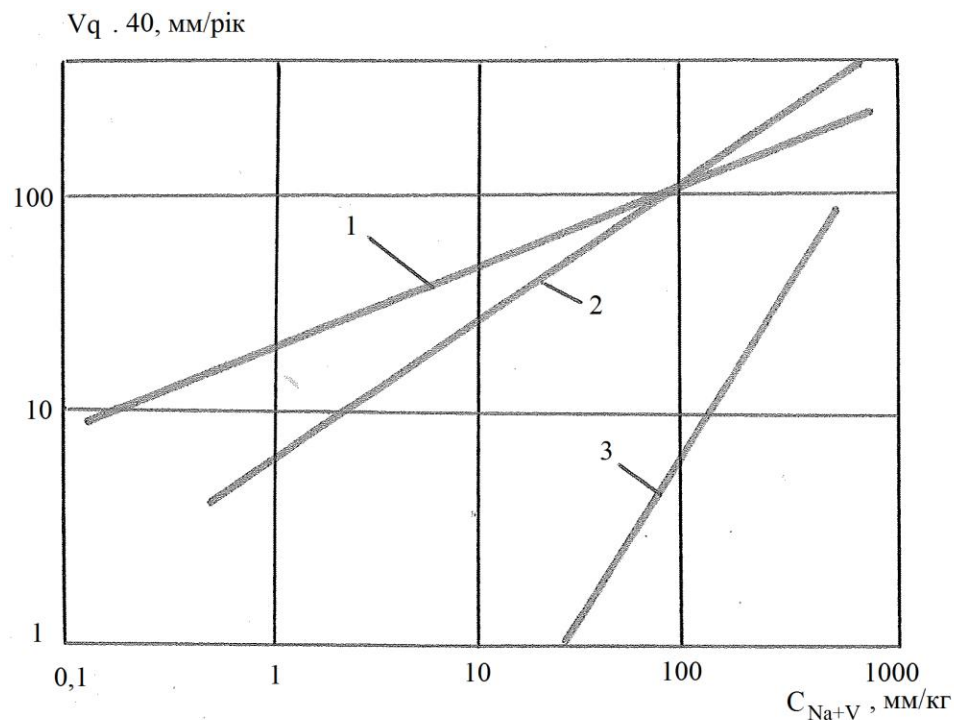
На пошкодження, спричинені, відповідно, статичними, втомні і термосталостними навантаженнями, накладається вплив робочого середовища, під дією якої протікають корозійні процеси.

Основними факторами, що визначають швидкість корозійного пошкодження, є корозійні властивості робочого середовища і температура газів на вході в турбіну при експлуатації ГТД.

Практично всі роботи, присвячені вивченню процесів корозійного руйнування, особливу увагу акцентують на присутність в паливі сполук лужних металів, ванадію, свинцю [1, 3, 4]. Основним джерелом шкідливих домішок є паливо, яке використовується в якості робочого середовища. Природний газ, який використовується в якості палива газових турбін, містить сірку - основну корозійно-активну домішку у вигляді сірководню і меркаптанової з'єднань в досить великих кількостях. Наприклад, об'ємний вміст сірководню в природному газі Оренбурзького родовища 1,5 ... 4,5% [5].

Якщо в проточну частину турбіни потрапляє ще і натрій, утворюється сульфат натрія, що сприяє прискоренню корозії лопаток.

Результати експериментальних даних у вигляді залежності середньої швидкості корозії металів від сумарного вмісту в паливі натрію і ванадію представлені на рисунку 1.1 [6].



1 – нікелеві сплави IN-738, U-500;

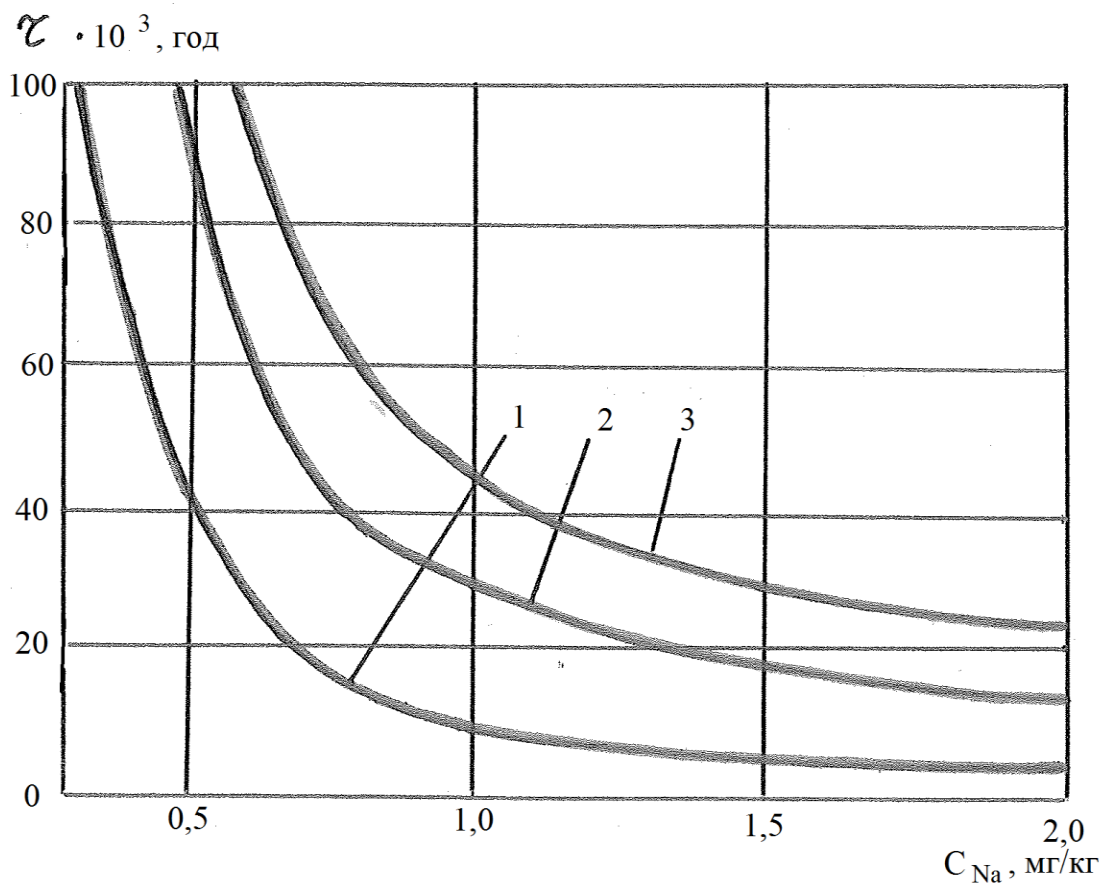
2 – хромонікелеві сталі;

3 – хромонікелевий сплав IN-667.

Рисунок 1.1 - Залежність середньої швидкості корозії матеріалів від змісту в паливі натрію і ванадію

Вплив вмісту натрію в паливі (з урахуванням змісту натрію в повітрі) на термін служби лопаток газових турбін досліджено фірмою «General Electric». Ця залежність наведена на рисунку 1.2 [7]. З рисунку 1.2 випливає, що при концентрації натрію в паливі 0,5 мг / кг термін служби робочих лопаток зі сплаву IN-738 без захисного покриття повинен становити не менше 70 тис. годин.

Однак на підставі рисунка 1.1 швидкість корозії його повинна перевищувати 0,3 мм / рік, тобто термін служби - не більше 10 тис. г. Ці протиріччя викликані, перш за все, різним рівнем температур і умовами протікання корозійних процесів в турбінах і на випробувальних стендах.



- 1 – сплав U-700;
- 2 – сплав IN-738 без покриття ;
- 3 – сплав IN-738 с покриттям RT-22.

Рисунок 1.2 - Вплив вмісту натрію в газотурбінному паливі на термін служби лопаток

При розгляді корозійного пошкодження деталей газових турбін, вся увага акцентується на поверхню, яка безпосередньо стикається з газовим потоком.

Ця концепція абсолютно вірна при використанні суцільних деталей. З використання полегшених, тобто порожнистих лопаток ГТУ, перш за все 1-го ступеня турбін, вона вимагає всебічного (комплексного) підходу в розгляді корозійних пошкоджень.

Тривала експлуатація робочих лопаток ТВД ГТК-10І і ГТН-16 без захисних покриттів показала, що оксисульфідної корозії в рівній мірі схильні як зовнішня так і внутрішня порожнина [8].

Зовнішній вигляд лопатки ГТН-16 після тривалої напрацювання (більше 17 тис. год) в умовах оксисульфідної корозії представлений на рисунку 1.3. Велика частина поверхні профільної частини покрита тонким щільним шаром окалини і продуктів корозії. Найбільш сильне корозійне враження металу спостерігається на вхідній кромці і центральній частині корита, де верхній шар окалини відшаровується. Уздовж вхідної крайки, з боку спинки і з боку корита відбувається локальне відділення окалини.

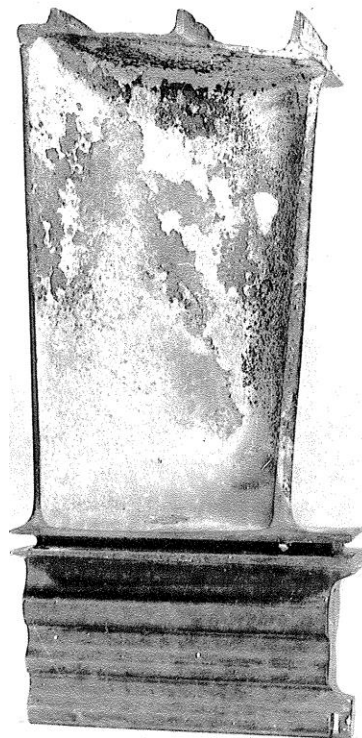
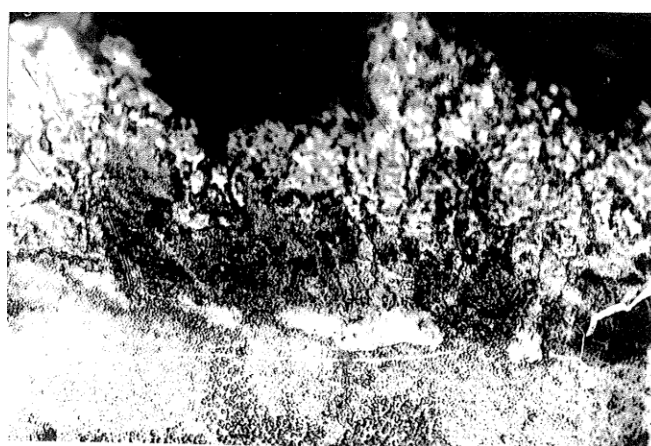


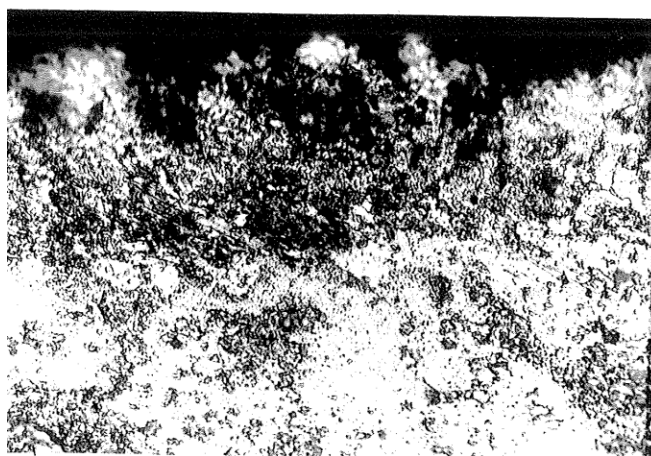
Рисунок 1.3 - Робоча лопатка газотурбінного нагнітача ГТН-16 після тривалої експлуатації (більш 17 тис. год)

Металографічним аналізом корозійного стану поверхні лопаток встановлено, що у верхній і середній перетинах профільної частини шар продуктів корозії, як зовнішньої, так і внутрішньої поверхні, неоднорідний і нерівномірний. Під шаром продуктів корозії розташована обезлегірована зона. Мікроструктура корозійного пошкодження поверхневого шару робочої лопатки ТВД ГТК-10І представлена на рисунку 1.4.



а

x 600



б

x 600

а – зовнішня поверхня профільної частини;

б – внутрішня поверхня профільної частини.

Рисунок 1.4 - Мікроструктура корозійного пошкодження робочих лопаток ГТК-10І

Відмітимо деякі закономірності, прийнятні при розгляді загального механізму оксисульфидної корозії внутрішньої порожнини порожнистих деталей ГТУ.

Найбільш важливим агресивним компонентом вважається сульфат натрію у вигляді конденсату [9] чи у вигляді суміші пари Na_2SO_4 з продуктами згорання [10].

При цьому сірка, що виділяється при взаємодії сульфату натрію і нікелю, дифундує через початковий шар оксиду нікелю і утворює сульфід [11]. Утворення евтектики $\text{Ni} - \text{Ni}_3\text{S}_2$ з низькою температурою плавлення веде до порушення захисної плівки оксидів. Надалі відбувається розвиток автокаталітичного процесу з утворенням і окисленням евтектики [12].

Таким чином, комплексний підхід в аналізі корозійного руйнування диктує насущну необхідність захисту не лише зовнішньої, але і внутрішньої поверхні профільної частини порожнистих лопаток ГТУ.

Висновки

Природний газ, який використовується в якості палива газових турбін, містить сірку - основну корозійно-активну домішку у вигляді сірководню і меркаптанової з'єднань в досить великих кількостях.

Середня швидкість корозії металів також залежить від сумарного вмісту в паливі натрію і ванадію.

2 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Матеріали дослідження

Розвиток ливарних жароміцних сплавів на нікелевій основі пов'язаний, передусім, з тим, що в порівнянні з деформованими сплавами в них можна досягти більшого зміцнюючого ефекту за рахунок γ' - фази і карбідів, більш високої структурної стабільності [13]. Їх різноманіття зв'язане з рівнем робочих температур і вимогами, що пред'являються до властивостей сплавів при цих температурах (зокрема, тривалій міцності, корозійній стійкості).

Важливою перевагою матеріалів цього класу є також можливість відливати з них тонкостінні охолоджувані лопатки складної конфігурації, виготовити які методами кування і штампування практично неможливо. Застосування ливарних жароміцних сплавів для лопаток ГТУ значною мірою сприяли успіхи в розробці керамічних матеріалів, оснащення і устаткування, що дозволяють отримувати відливання з каналами для охолодження.

Для стаціонарних газових турбін широке поширення отримали жароміцні корозійностійкі сплави на нікелевій основі ЭП-539ЛМ, ЧС-70ВІ, а також сплави, розроблені ЗНТУ - ЗМІ- 3 і ЗМІ-3У замість імпорتنих сплавів IN - 738. Використовуються вони для виготовлення робочих лопаток газових турбін ТВД ГТК-10И, ГТН- 16.

Хімічний склад досліджуваних жароміцних сплавів приведений в таблиці 2.1.

2.2 Металографічні дослідження

Дослідження мікроструктури проводилися на нетруєних і труєних мікрошліфах під мікроскопом "Неофот-2" і мікроскопом-аналізатором "Стереоскан". Мікротвердість вимірювали приладом ПМТ- 5. Фазовий склад і періоди грат основних складових - на дифрактометре ДРОН- 1 в мідному $K\alpha$ - випромінюванні. Зміст хімічних елементів - на рентгеноспектральному

мікроаналізаторі Cameca MS - 46.

Таблиця 2.1 - Хімічний склад досліджених ливарних ЖНС

Марка сплаву	Вміст елементу, % за масою														
	C	Cr	Co	Al	Ti	Mo	W	Nb	Ta	Hf	Ni	Re	Ru	Zr	B
ЗМІ-З	0,1	13,2	5,5	2,9	4,9	1,8	4,5	-	-	-	осн.	-	-	-	-
ЗМІ-ЗУ	0,11	13,2	5,0	3,4	4,8	0,9	7,3	-	-	-	осн.	-	-	-	0,015
ЧС70	0,09	15,8	10,7	2,8	4,6	2,0	5,5	0,2	-	-	осн.	-	-	0,050	0,020
ІН-738	0,10	16,0	8,5	3,4	3,4	1,75	2,6	0,9	1,75	-	осн.	-	-	0,050	0,010
ЕП-539	0,07	18,0	19,0	3,0	3,0	4,2	-	-	-	-	осн.	-	-	0,05	0,007
ЕІ-929	0,06	15,5	17,0	4,7	3,5	5,0	-	-	-	-	осн.	-	-	0,02	0,030

Мікроструктура виявлялася за допомогою того, що труїть поверхні шліфів реактивом Марбле - CuSO_4 - 4 г, HCl - 20 мл, вода - 20 мл по режиму: труїть 10 - 15 секунд, промивання водою, сушка гарячим повітрям. Для виявлення евтектики $\gamma + \gamma'$ і γ' - фази використовувався реактив CuSO_4 - 20 г, H_2SO_4 - 5 мл, решта - H_2O , щільність струму - 500 A/m^2 . Для виявлення карбідів, використовувався реактив NaF - 30 г, HCl - 100 мл, лимонна кислота - 100 г, H_2O - 1000 мл, щільність струму - 200 A/m^2 . Для ідентифікації σ - фази і карбідів типу M_6C , що мають схожу голчасту морфологію, проводилося кольорове труєння за допомогою реактиву: червона кров'яна сіль - 10 г, NaOH - 10 г, H_2O - 100 мл, щільність струму 500 A/m^2 .

З метою зведення відносної помилки до мінімуму, на зразки (пластини) наносили термофарбу ТР- 5 і ТР- 8, а термополя фіксували після 10...15 хв стабілізації режиму випробувань.

Таким чином, вибір для досліджень порожнистих зразків, створення їм складного обертального руху із забезпеченням попадання газового потоку у внутрішню порожнину (включаючи термоцикли), обробка результатів випробувань з урахуванням особливостей двостороннього корозійного ушкодження дає можливість прогнозувати корозійну стійкість порожнистих деталей ГТУ.

2.3 Оцінка механічних властивостей сплавів

Випробування на короточасну міцність (ГОСТ 1497-61, ГОСТ 9651-61, ГОСТ 1497-84) проводили на стандартних циліндричних зразках (діаметр робочої частини 5мм, довжина 25мм) при температурах 200, 800, 900 і 1000⁰С на розривній машині марки УМЭ-10ТМ. Випробування на тривалу міцність (ГОСТ 10145-81) проводили на стандартних циліндричних зразках при температурах 800, 900, 1000⁰С і відповідних навантаженнях 600, 400, 180 МПа на машині АИМА- 5-2 шляхом одновісного розтягування зразків при постійному навантаженні. Відносне подовження зразків фіксували за допомогою механічних тензометрів (рис. 2.1).

При кожному рівні навантаження випробовували по 3 - 5 зразків.

Для оцінки міри зниження міцнісних характеристик досліджуваних сплавів в результаті тривалої теплової дії при температурах 850⁰ і 950⁰С з різною базою старіння 1000, 3000, 5000 годин проводили додаткові випробування зразків відповідно до вищезгаданих стандартів.

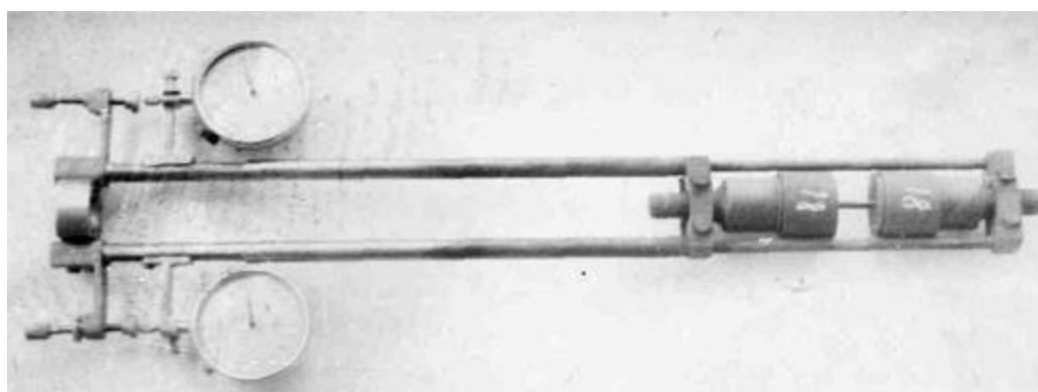


Рис. 2.1 - Механічний тензометр із зразком в захопленнях

2.4. Оцінка високотемпературної корозійної стійкості

Порівняльні експериментальні дослідження ВТК - стійкості зразків

сплавів проводилися в синтетичній золі за методикою, розробленою Нікітіним В.І. (ЦКТІ ім. І. І. Ползунова), яка широко застосовується в галузі. Для корозійних випробувань використовувалися стандартні циліндричні зразки (діаметр $\varnothing 10$ мм, довжина $l = 12$ мм), на які після попереднього знежирення, вимірювання і зважування на аналітичних вагах з точністю ($\pm 0,0005$ г), наносилася на їх поверхню синтетична зола в кількості 12 мг / см^2 , що імітує продукти згоряння газотурбінного палива наступного складу: Na_2SO_4 - 66,2%; Fe_2O_3 - 20,4% ; NiO - 8,3% ; CaO - 3,3% ; V_2O_5 - 1,8%, за масою, які розміщувалися і витримувалися в печі на платформі з вогнетривкого матеріалу в повітряній атмосфері. Порівняльні корозійні випробування проводилися в синтетичній золі за температур 800^0 , 850^0 , 900^0 і 950^0C протягом (100...300) годин. Після проведення експериментів продукти корозії вилучалися за методикою водневого відновлення окалини, розробленої ЦКТІ ім. І.І. Ползунова. Порівняльна стійкість зразків досліджуваних сплавів до ВТК оцінювалася за питомою втратою маси (q , г/м^2) і середньою швидкістю корозії ($\bar{V}_q$, $\text{г/м}^2\cdot\text{с}$).

Питома втрата маси (q , г/м^2) розраховувалася за формулою (2.1):

$$q = \frac{\Delta m}{S}, \quad (2.1)$$

де Δm - втрата маси зразка після видалення продуктів корозії, г ;

S - площа поверхні зразка, м^2 .

Середня швидкість корозії ($\bar{V}_q$, $\text{г/м}^2\cdot\text{с}$) розраховувалася за формулою (2.2):

$$\bar{V}_q = \frac{q}{\tau}, \quad (2.2)$$

де τ - тривалість випробувань, с.

Висновки

Для металографічних досліджень використовуються сучасні: мікроскопом "Неофот-2", мікроскопом-аналізатор "Стереоскан". Мікротвердість вимірювали приладом ПМТ- 5. Фазовий склад і періоди грат основних складових - на дифрактометре ДРОН- 1 в мідному К α - випромінюванні. Зміст хімічних елементів - на рентгеноспектральному мікроаналізаторі Cameca MS - 46.

Випробування на короткочасну міцність (ГОСТ 1497-61, ГОСТ 9651-61, ГОСТ 1497-84) проводили на стандартних циліндричних зразках при температурах 20, 750 і 850 °С на розривній машині марки УМЭ-10ТМ.

Для ідентифікації фаз в сплавах використовувався метод локального мікрозондського аналізу на приставці МРСА до растрового електронного мікроскопа JEOL JSM - 6360la с системою енергодисперсійного рентгено-спектрального мікроаналізу JED - 2300.

Порівняльні експериментальні дослідження ВТК - стійкості зразків сплавів проводилися в синтетичній золі за методикою, розробленою Нікітіним В.І. (ЦКТІ ім. І. І. Ползунова).

ЗДОСЛІДЖЕННЯ НАТУРНИХ РОБОЧИХ ПОРОЖНИСТИХ ЛОПАТОК ГТК-10І

3.1 Аналіз стану поверхні робочих лопаток після напрацювання 15 тис. годин

Як вже наголошувалося, перо робочих лопаток схильне до тривалої високотемпературної дії при складному напруженому стані, дії газового потоку.

Розрахунок температурних полів і напруги в робочій лопатці ГТК-10І на режимах «пуск», «зупинка» і «стаціонарний режим», заснованих на розрахунку граничних умов теплообміну для металу лопатки [15] показав, що максимальна температурна напруга виникає на увігнутій стороні, спинці, вхідній кромці і у відповідних їм точках поверхні внутрішніх порожнин лопатки, а також в місцях з'єднання внутрішньої перемички. Тому особлива увага при дослідженнях приділялася сеченічм саме в цих місцях.

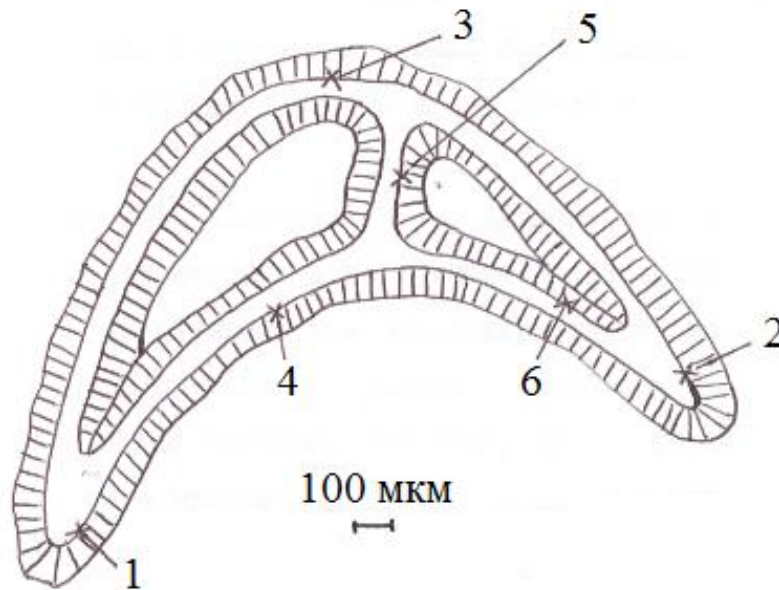
Аналіз поверхневого руйнування робочих лопаток ГТК-10І показав, що величина і характер його залежить, перш за все, від напрацювання, стану робочого середовища, запиленої повітря, а також швидкості газового потоку [8].

Далі приведені корозійні дослідження робітників лопаток ГТК-10І (напрацювання більше 18 тис. ч) із сплаву ЗМІ-3 без захисних покриттів. Металографічні дослідження поперечного перетину профільної частини показали, що глибина корозійної поразки внутрішньої поверхні лопаток переважає над пошкодженнями зовнішньої поверхні [16].

На рисунку 3.1 приведений середній перетин з епюрами корозійної поразки профільної частини робочих лопаток після промислової експлуатації більше 15 тис. годин.

Структура корозійного пошкодження профільної частини пера лопатки наведена на рисунках 3.2 і 3.3. Слід зазначити, що корозійному пошкодженню лопатки піддаються вже в початковий період експлуатації.

Наприклад, глибина шару корозійної поразки після 9,5 тис. г напрацювання має розмір глибини шару після 15 тис. г (рисунок 3.4).



1 – 6 – місця для дослідження пошкоджень.

Рисунок 3.1 – Епюри корозійного пошкодження

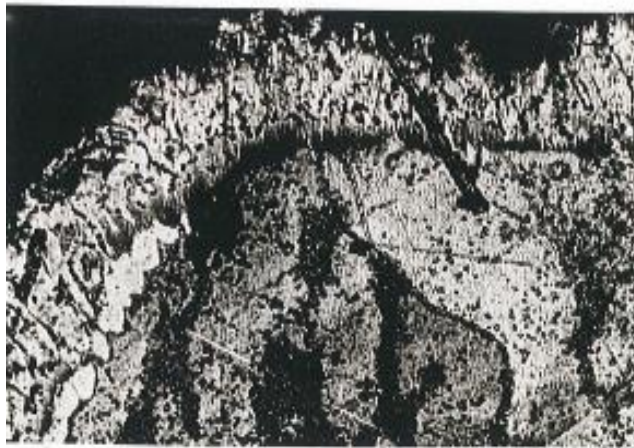
3.2 Тонкі дослідження стану поверхонь робочих лопаток

Отримані серії кривих, що характеризують концентраційний розподіл Ni, Cr, Ti, Al, W, Mo, а також сульфідів типу Ti_2S_3 (рисунки 3.6 та 3.7).

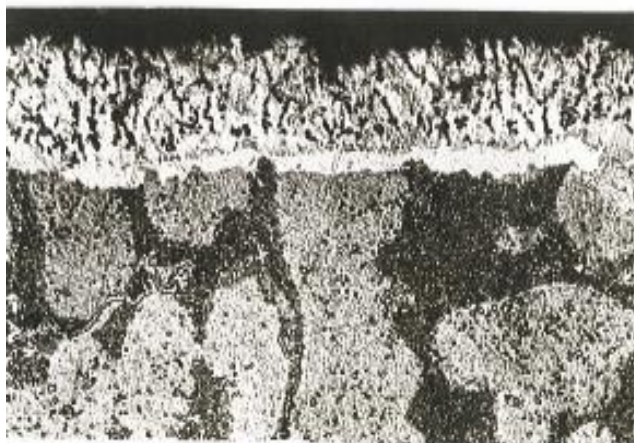
Аналізуючи структуру корозійного шару і концентраційні криві, можна, в принципі, виділити три основні зони. Найбільш пориста зовнішня зона є оксидом NiO, в якому розчинені легуючі елементи сплаву з вмістом оксидів типу Me_2O_3 , утворені на основі Cr_2O_3 . Проміжний шар утворений шпінелью $Ni (Cr, Al)_2O_4$, включає оксиди і легуючі елементи сплаву (титан, кобальт, вольфрам, молібден і ін.). Як включення в цьому шарі, очевидно, знаходяться дрібні зерна (близько 3.10 мкм), що складаються майже з чистого нікелю. Нижній шар найбільш тонкий, має надзвичайно складний склад з включеннями сульфідів (наприклад, сульфідів TiS та Ti_2S_3).



1



2

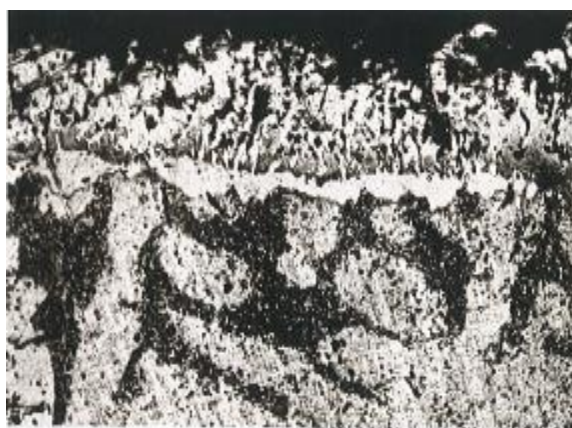


3

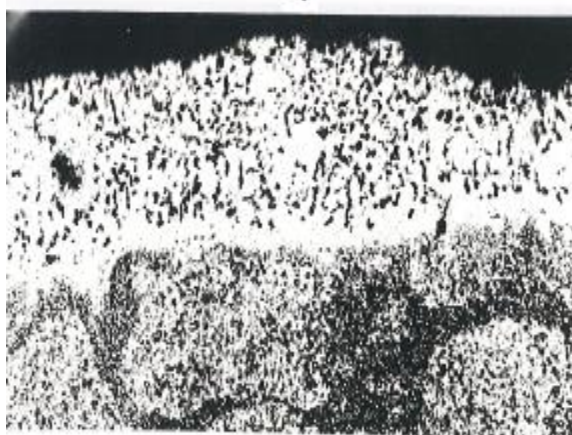
x 300

1-3 – крапки на рисунку 3.1

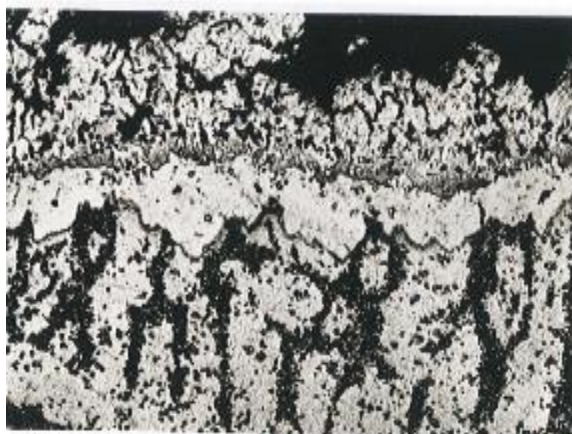
Рисунок 3.2 – Структура профільної частини робочої лопатки



4



5



6

x 300

4-6 – крапки на рисунку 3.1

Рисунок 3.3 – Структура профільної частини робочої лопатки



а



б

х 300

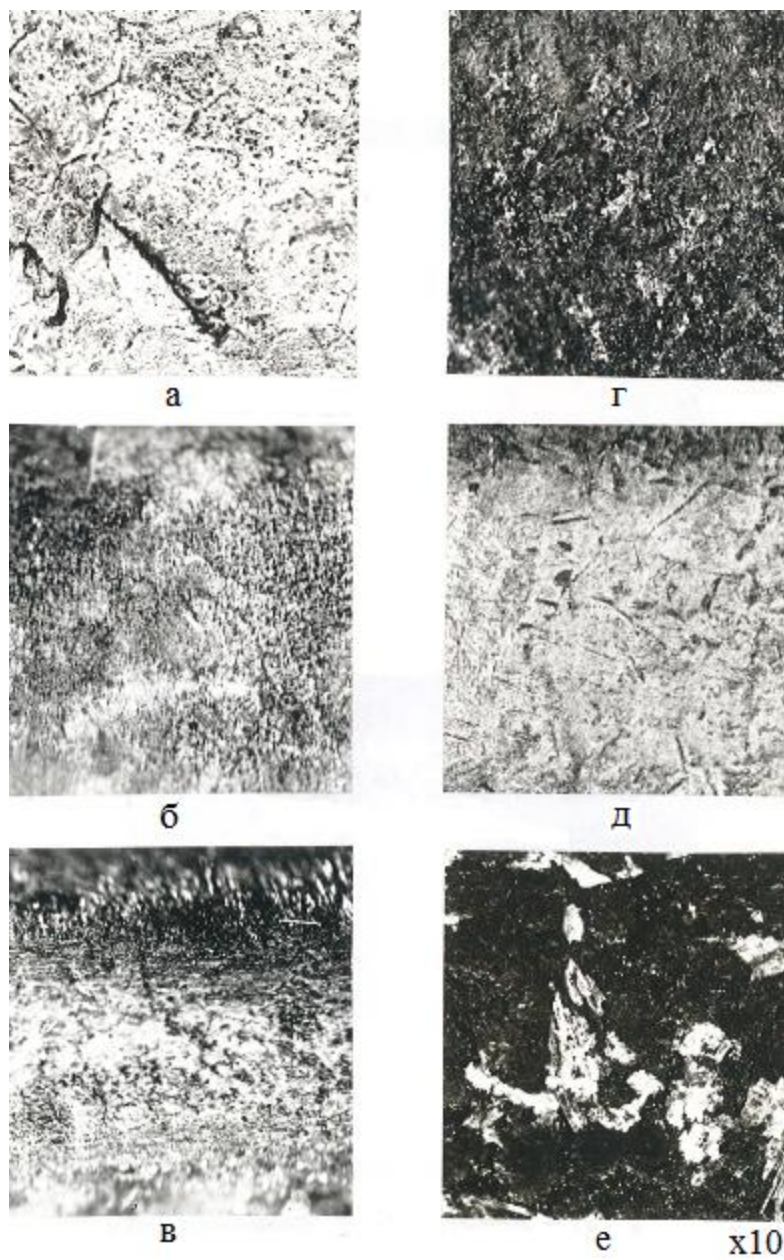
а – внутрішня поверхня;

б – зовнішня поверхня.

Рисунок 3.4 – Структура поверхневого шару робочої лопатки після напрацювання 9,5 тис. години

Швидкість корозії вольфраму і сплаву ЦНК- 7 на базі 6 годин склала 316,7 і 52,6 г/см²*ч відповідно (для порівняння, сталь 45 мала 74,6, а ЭИ- 929 - 79,3 г/см²*ч). Поверхня зразків зображена на рисунку 3.5.

З рисунку видно, що сплави ЧС- 70, ЗМИ-3У і IN - 738 мають відносно рівномірне корозійне руйнування по поверхні. Хром руйнується, в основному, по межах зерен. Вольфраму властива виразкова корозія.



- а – хром;
- б – ЧС-70;
- в – ЗМИ-3У;
- г – IN-738;
- д – титан;
- е – вольфрам.

Рисунок 3.5 – Поверхня зразків після випробувань в розплаві солей
 90 % Na_2SO_4 + 10 % NaCl

3.3 Корозійна стійкість в розплавах солей

Результати випробувань плоских литих пластинів жароміцних сплавів і зразків різних металів, що являються для сплаву або захисного покриття основою або легуючими елементами в солевій розплаві 90 % Na_2SO_4 + 10 % NaCl при температурі 900 °С впродовж 6 і 24 годин показали, що найбільшу стійкість проти оксисульфидної корозії має чистий хром (узятий за еталон, 100 %). Далі перспективні жароміцні сплави ЧС- 70, або в первинному варіанті ЗМІ- 2 (85,7 %) і ЗМІ-3У (72,4 %), Услід ІН - 738 (41,2 %), титан (26,9 %) і нержавіюча сталь 06Х18Н10Т (23,1 %). Найнижчу стійкість мали зразки нікелю, кобальту, ЭИ- 929 (після 24 годин розчинилися повністю).

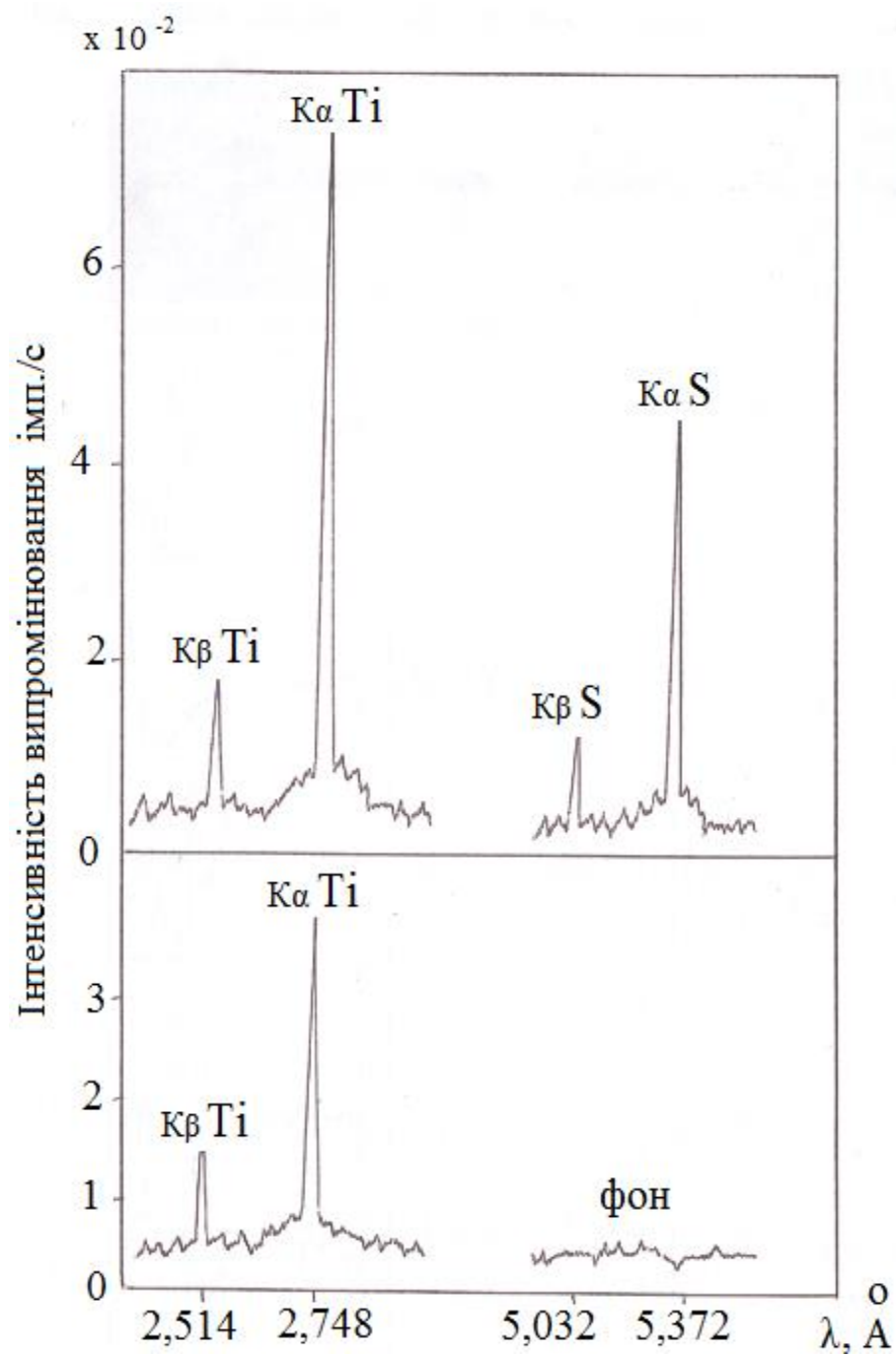
3.4 Дослідження механічних властивостей робочих лопаток ГТК-10І після напрацювання більш 15 тис. годин

Дослідження властивостей міцності сплаву ЗМІ-3 проводили на зразках, що були вирізані з робочих порожнистих лопаток після експлуатації.

Короткотривалі механічні властивості деталей лопаток при різних температурах з дослідного сплаву наведені на рисунку 3.8.

Наведені дані вказують на зниження короткочасної міцності сплаву ЗМІ-3 відносно початкових значень (паспортні дані) приблизно на 16-20%. Зниження межі міцності та плинності сплаву характерно й для зразків, що вирізані із робочих лопаток після експлуатації.

Досліджували зразки вирізані з робочих порожнистих лопаток після експлуатації на довготривалу міцність та порівнювали одержані результати з паспортними даними сплаву. За результатами випробувань було встановлено, що внаслідок структурних змін у сплаві при експлуатації, час до руйнування зразків під навантаженням знизився приблизно 18-22%. Дані випробувань наведені на рисунку 3.9.



а – поверхневий шар;

б – основа сплаву.

Рисунок 3.6 – Концентраційні криві вмісту титану та сірки

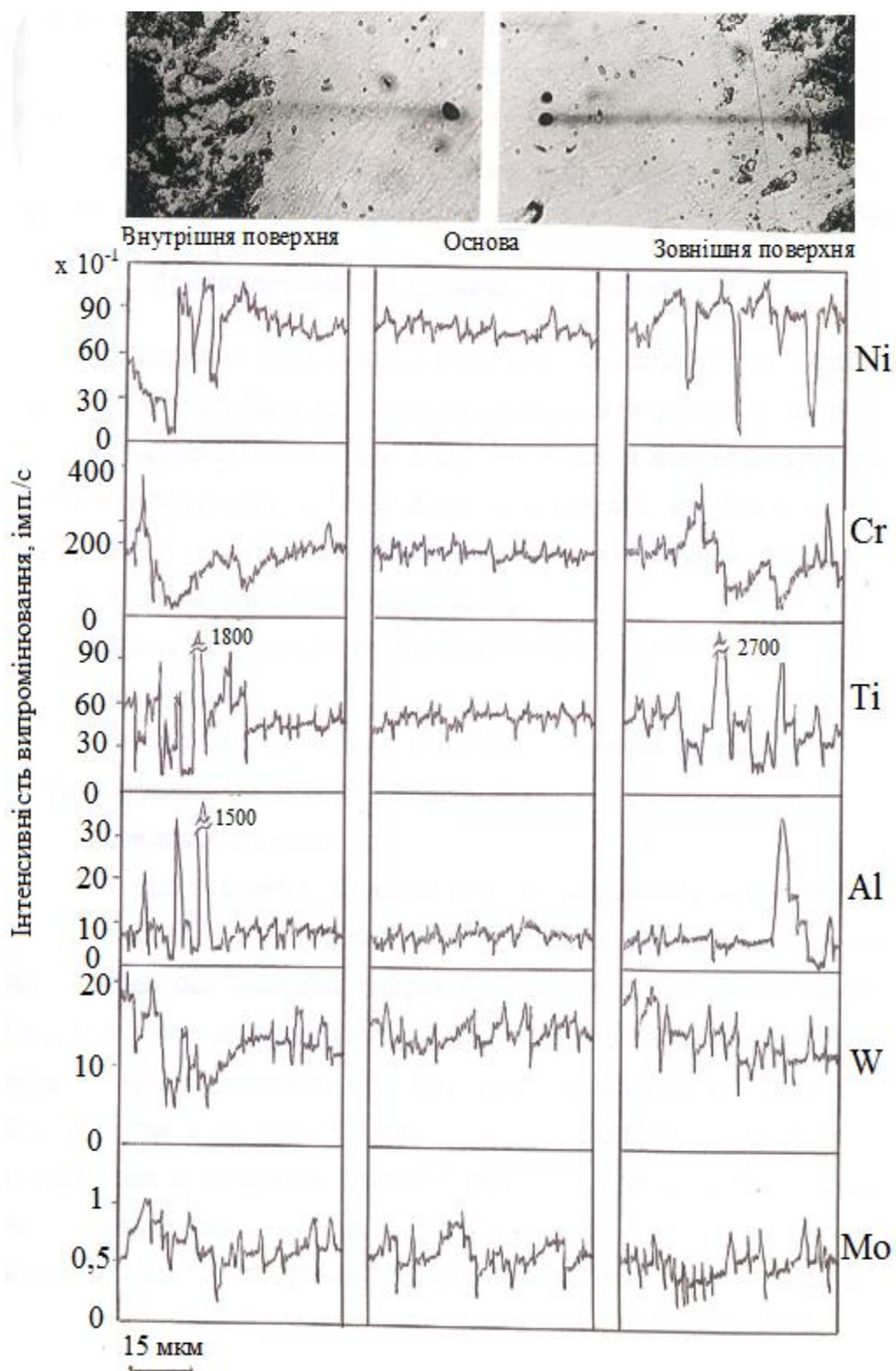
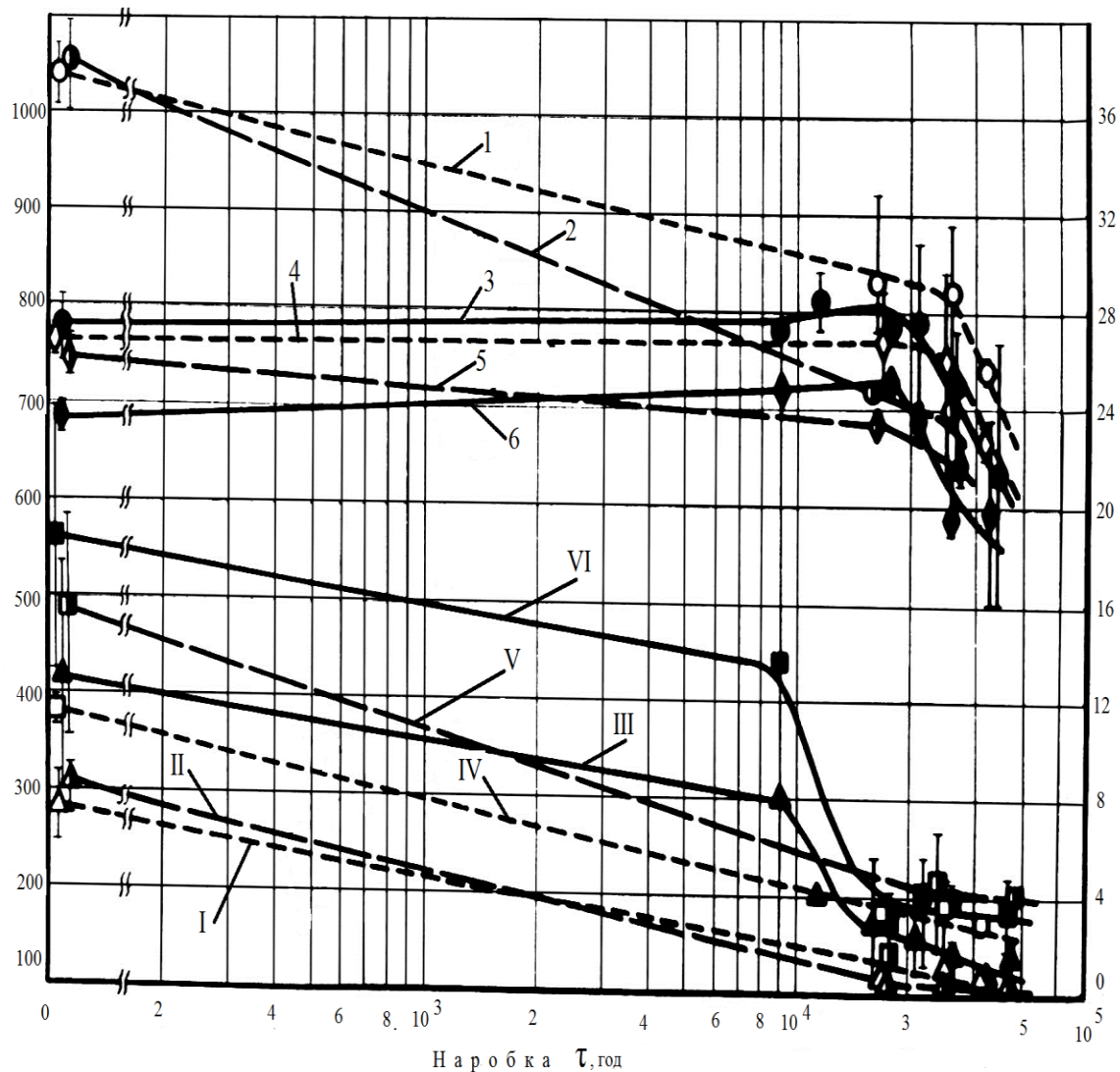


Рисунок 3.7 – Концентраційні криві розподілу елементів в поверхневому шарі робочої лопатки (сплав ЗМІ-3)

$\sigma_B, \sigma_{0,2}, \text{МПа}$
 $\delta, \Psi, \%$


- 1 – σ_B^{20} ; I – δ^{20} ;
 2 – σ_B^{750} ; II – δ^{750} ;
 3 – σ_B^{850} ; III – δ^{850} ;
 4 – $\sigma_{0,2}^{20}$; IV – Ψ^{20} ;
 5 – $\sigma_{0,2}^{750}$; V – Ψ^{750} ;
 6 – $\sigma_{0,2}^{850}$; VI – Ψ^{850} .

Рисунок 3.8 – Короткочасні властивості

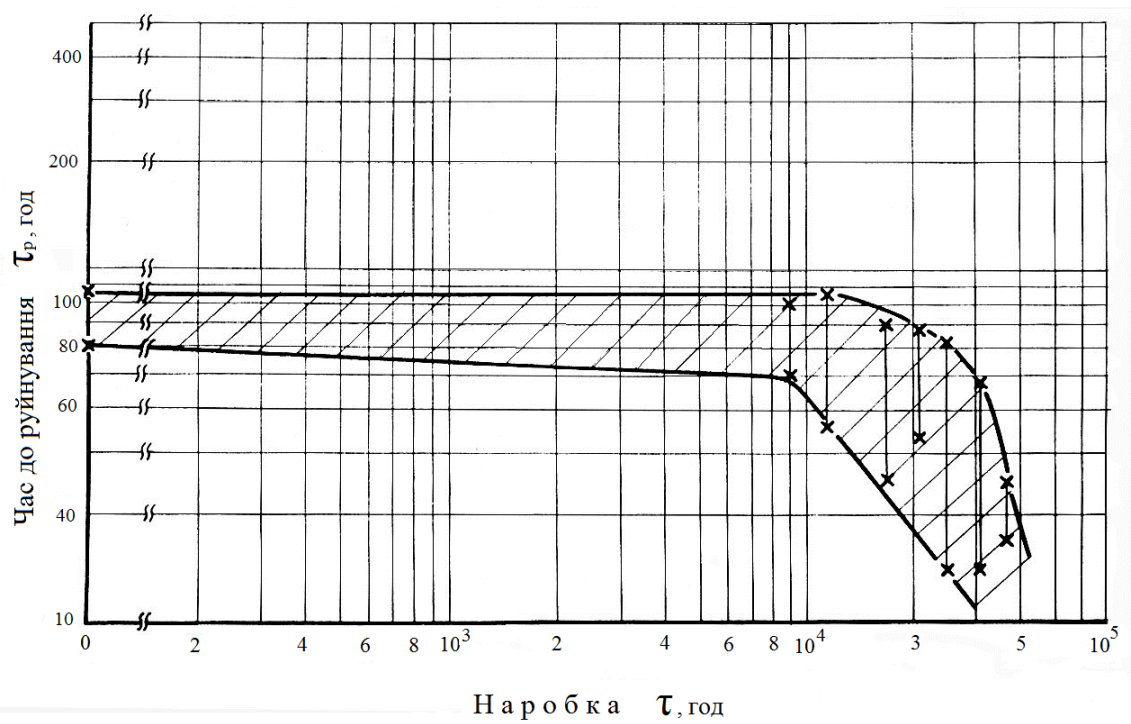


Рисунок 3.9 Довготривала міцність ($T = 850^\circ\text{C}$, $\sigma = 400\text{ МПа}$)

ВИСНОВКИ

1. Показано, що робоче середовище суттєво впливає на працездатність робочих порожнистих лопаток ГТК-10І.
2. Показано, які хімічні елементи зменшують ресурс експлуатації робочих лопаток в декілька разів.
3. Показано, що внутрішня поверхня пошкоджується відносно більше.
4. Встановлено, що зовнішній шар профільної частини не показав глибоких пошкоджень за рахунок їх уносу швидкісним газовим потоком.
5. Встановлено, що корозійні пошкодження починаються з початку експлуатації.
6. Встановлено, що в пошкодженому шару містяться сульфід типу TiS та Ti_2S_3 .
7. Показано, що короткочасна міцність сплаву ЗМІ-3 відносно початкових значень (паспортні дані) зменшується приблизно на 16-20 %.
8. Встановлено, що внаслідок структурних змін у сплаві при експлуатації, час до руйнування зразків під навантаженням знизився приблизно 18-22%.
9. На підставі виконаних досліджень для підвищення працездатності необхідно використання захисних покриттів.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

На підставі виконаної роботи можна зробити наступні висновки.

Природний газ, який використовується в якості палива газових турбін, містить сірку - основну корозійно-активну домішку у вигляді сірководню і меркаптанової з'єднань в досить великих кількостях.

Середня швидкість корозії металів також залежить від сумарного вмісту в паливі натрію і ванадію.

Для металографічних досліджень використовуються сучасні: мікроскопом "Неофот-2", мікроскопом-аналізатор "Стереоскан". Мікротвердість вимірювали приладом ПМТ- 5. Фазовий склад і періоди грат основних складових - на дифрактометре ДРОН- 1 в мідному $K\alpha$ - випромінюванні. Зміст хімічних елементів - на рентгеноспектральному мікроаналізаторі Cameca MS - 46.

Випробування на короткочасну міцність (ГОСТ 1497-61, ГОСТ 9651-61, ГОСТ 1497-84) проводили на стандартних циліндричних зразках при температурах 20, 750 і 850 $^{\circ}\text{C}$ на розривній машині марки УМЭ-10ТМ.

Для ідентифікації фаз в сплавах використовувався метод локального мікрозондського аналізу на приставці МРСА до растрового електронного мікроскопа JEOL JSM - 6360la с системою енергодисперсійного рентгено-спектрального мікроаналізу JED - 2300.

Порівняльні експериментальні дослідження ВТК - стійкості зразків сплавів проводилися в синтетичній золі за методикою, розробленою Нікітіним В.І. (ЦКТИ ім. І. І. Ползунова).

Показано, що внутрішня поверхня пошкоджується відносно більше.

Встановлено, що зовнішній шар профільної частини не показав глибоких пошкоджень за рахунок їх уносу швидкісним газовим потоком.

Встановлено, що корозійні пошкодження починаються з початку експлуатації.

Встановлено, що в пошкодженому шару містяться сульфід типу TiS та Ti_2S_3 .

Показано, що короткочасна міцність сплаву ЗМІ-3 відносно початкових значень (паспортні дані) зменшується приблизно на 16-20 %.

Встановлено, що внаслідок структурних змін у сплаві при експлуатації, час до руйнування зразків під навантаженням знизився приблизно 18-22%.

На підставі виконаних досліджень для підвищення працездатності необхідно використання захисних покриттів.

Розглянуті питання охорони праці, санітарної гігієни, пожежної безпеки при проведенні дослідних робіт. Наведені рішення по безпеці в надзвичайних ситуаціях.