

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до лабораторних робіт з дисципліни
«Експертні дослідження руйнування виробів»
для студентів спеціальності 132 «Матеріалознавство»
(«Прикладне матеріалознавство», «Термічна обробка металів»)
усіх форм навчання

Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Експертні дослідження руйнування виробів» для студентів спеціальності 132 «Матеріалознавство» («Прикладне матеріалознавство», «Термічна обробка металів») усіх форм навчання /Укл.: В.С. Вініченко, О.А. Глотка, О.В.Лисиця - Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2025. – 78 с .

Укладачі: В.С. Вініченко, доцент, к.т.н.
О.А. Глотка, доцент, к.т.н.
О.В. Лисиця, старший викладач

Рецензент: В.Ю. Ольшанецький, професор, д.т.н.

Відповідальний за випуск: В.Ю. Ольшанецький, професор, д.т.н.

Рекомендовано
до видання НМК інженерно-
фізичного факультету
Протокол № 5
від 28 січня 2025 р.

Затверджено
на засіданні кафедри
«Фізичне матеріалознавство»
Протокол № 5
від «6» грудня 2024 р.

ЗМІСТ

Вступ	4
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1 Дослідження процесів руйнування кристалічних та аморфних матеріалів	6
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2 Особливості поширення тріщин у кристалічних матеріалах при крихкому та в'язкому руйнуванні	18
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3 Дослідження причин зародження тріщин. Руйнування.....	30
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4 Приклад виконання експертної роботи на тему «Дослідження причин руйнування колінчатого валу тепловозу»	36
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5 Приклад виконання роботи на тему «Дослідження причин зниженої стійкості ливарних мульт»	44
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6 Проведення експертизи причин руйнування робочої лопатки I ступені компресора ГТД.....	54
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №7 Проведення експертизи причин руйнування жарової труби авіаційного ГТД.....	62
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №8 Проведення експертизи причин руйнування робочої лопатки I ступені газової турбіни авіаційного ГТД.....	67
ЛІТЕРАТУРА	76
Додаток А Правила із техніки безпеки при виконанні лабораторних робіт	77

ВСТУП

В сучасних економічних умовах на підприємствах приділяється увага зниженню витрат на виробництво продукції та її експлуатацію. Одним з шляхів вирішення цієї проблеми є повне використання ресурсу обладнання та виробів. У зв'язку з цим необхідно після певного періоду роботи проводити діагностику, наприклад, технологічного устаткування, тобто перевіряти його технічний стан, а у випадку виходу з ладу якої-небудь деталі встановлювати причини її поломки. Для вирішення вказаних питань необхідні фахівці високого рівня, яких на сьогодні недостатньо на виробництві. Тому на даний момент є актуальною дисципліна «Експертні дослідження», яка сприяє підвищенню кваліфікації вказаних спеціалістів.

При вивченні даної дисципліни досліджуються причини та механізми розвитку пошкоджень, що приводять до повного або часткового руйнування елементів конструкції. Пошкодження можуть виникати з багатьох причин, наприклад, в результаті зносу або ерозії поверхні, спотворення форми, зниження твердості інструменту, втрати пружності пружини і ін. У зв'язку з цим для встановлення причин відмови та повернення системи до штатного режиму функціонування необхідне застосування комплексного підходу. Тобто об'єднуються зусилля різних фахівців: конструкторів, механіків, спеціалістів з тертя та зношування, автоматичного регулювання, неруйнівного контролю і матеріалознавства.

При проведенні вказаних досліджень, зокрема спеціалісти з матеріалознавства з'ясовують:

- раціональність вибору матеріалів для певних умов експлуатації;
- відповідність хімічного складу застосовуваних матеріалів вимогам креслення;
- якість проведення запланованих конструктором термічної, хіміко-термічної чи інших видів обробок.

Для вирішення цих питань студенти при виконанні лабораторних робіт з дисципліни «Експертні дослідження» повинні навчитися застосовувати набуті знання з фізико-механічних і експлуатаційних властивостей матеріалів, моделювання, діагностики та дефектоскопії, стандартизації та контролю якості продукції для

встановлення причин передчасного руйнування чи виходу з ладу деталей, надавати рекомендації щодо усунення таких причин.

Проведення матеріалознавчої частини експертних досліджень доцільно розділити на наступні етапи.

1. За допомогою довідників, монографій, підручників, досвіду реального виробництва охарактеризувати умови експлуатації виробу, оцінити середні та можливі максимальні напруження і деформації, що можуть виникати при виготовленні та експлуатації виробу, середовище (агресивне, підвищена або навпаки понижена температура), конструкцію, зокрема вказати місця розташування концентраторів напружень;

2. Описати хімічний склад матеріалу, з якого виготовлений даний виріб, його термічну обробку, структуру, властивості; дефекти в заготовках, які можуть з'явитись в процесі виготовлення та експлуатації виробу;

3. На основі аналізу попередньої інформації запропонувати гіпотези щодо можливих причин передчасного виходу виробу з ладу;

4. Для підтвердження висунутих гіпотез вибрати методики дослідження і моделювання (фізичного і, або математичного). Навести стандарти основних методик та детально описати нестандартні запропоновані методики проведення досліджень, моделювання і обробки отриманих результатів, навести ескізи зразків;

5. порівняти вимоги до матеріалу виробу, зокрема складу, структури, стану поверхні, властивостей зміцненого шару та серцевини з результатами досліджень. Дати пояснення змінам структури, властивостей, форми виробу, що досліджується.

На основі результатів дослідження скласти експертне заключення щодо причин передчасного виходу з ладу даного виробу та запропонувати рекомендації з метою підвищення його ресурсу, наприклад, замінити матеріал на більш доцільний; удосконалити конструкцію; покращити умови експлуатації; застосувати більш сучасні технології, зокрема термічної обробки у вакуумі, лазерного поверхневого зміцнення, методи порошкової металургії тощо.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

Дослідження процесів руйнування кристалічних та аморфних матеріалів

Мета роботи: провести порівняльні дослідження структури, фізико-механічних властивостей крихких та пластичних матеріалів

Загальні положення

Відомо, що для таких конструкцій як судна, мости, балони високого тиску, газопроводи, шлюзи, ємності для зберігання рідких газів існує небезпека руйнування, часто несподіваного. Інженерам потрібно було пройти довгий шлях, повний сумнівів і катастроф, щоб переконатися в корисності власних розрахунків на міцність. Разом з тим виявилось, що такий розрахунок, який може бути здійснений тільки на основі вивчення механізму зародження та розвитку процесу руйнування, може здешевити подібну конструкцію. Проте поки повністю не розкрита природа явища руйнування, проблему не можна вважати вирішеною, оскільки без знання основних закономірностей та причин руйнування не можна бути впевненим, що вжиті заходи оптимальні. Саме знання механізму та причин руйнування дає можливість створити умови, у яких вказаний процес буде неможливим.

Особливості руйнування твердих кристалічних тіл

Питання руйнування твердих тіл пов'язано з однією з найважливіших проблем сучасного матеріалознавства - проблемою міцності.

За характером деформування матеріалу в процесі руйнування умовно розділяють на крихке та в'язке. Руйнування називають крихким, якщо воно відбувається при переважно пружному деформуванні матеріалу, тобто при напруженнях, менших за умовну границю плинності. Як правило, крихке руйнування твердих тіл спостерігається при низьких температурах, високих швидкостях навантаження, багаточиклової втомі.

В'язким називають руйнування, що супроводжується розвитком помітних пластичних деформацій. Такий характер руйнування спостерігається при підвищеній температурі, високому зовнішньому тиску, малоциклової втомі.

У кожному випадку руйнування не є миттєвою критичною подією. Руйнування – це процес накопичення пошкоджень, що відбувається в часі і у просторі. Закінчується цей процес втратою несівної здатності через втрату суцільності.

За характером активізації процесу у просторі руйнування підрозділяють на локалізовані та об'ємні. Локалізоване руйнування уявляє собою розвиток і поширення однієї або декількох макроскопічних тріщин. Руйнування внаслідок поширення тріщин характерно для великогабаритних деталей машин та елементів конструкцій, у матеріалі яких у вхідному стані є макроскопічні дефекти у вигляді тріщин.

Об'ємне руйнування уявляє собою процес накопичення пошкоджень на мікро- і макрорівні рівномірно в усьому об'ємові матеріалу. Таким чином, об'ємне руйнування уявляє собою процес розпушення структури матеріалу. Саме такий характер руйнування спостерігали О. Я. Берг при стисканні бетону та П.В. Бріджмен при розтягуванні скла під тиском.

Якщо навколо вершини тріщини утворюється значна зона пластично-деформованого матеріалу, таке руйнування називають в'язким. Для характеристики в'язкої тріщини розроблено математичний апарат нелінійної механіки руйнування.

В області вершини крихкої тріщини матеріал перебуває практично в пружному стані або розмір пластичної зони настільки малий у порівнянні з розміром тріщини, що ним можна нехтувати. Для крихких тріщин справедливий математичний апарат лінійної механіки руйнування, заснований А. А. Гріффітсом в 1920р.

Викладена вище класифікація відображає все-таки не процес руйнування, а явища, що передують розриву матеріалу. Тому така класифікація є умовною, на стільки, наскільки умовною є границя плинності та наскільки чутливими є засоби вимірювання пластичної деформації перед розривом. На практиці під крихким руйнуванням можна розуміти поділ матеріалу на окремі частини без помітної попередньої деформації.

Суворі класифікації руйнування можливі тільки на основі фізичних параметрів процесу, пов'язаних з механізмом пошкодження в часі. Один і той же матеріал при різних умовах (температура, тиск, швидкість навантаження, вид напруженого стану та ін.) може руйнуватися в одних випадках крихко, а в інші – в'язко. Тому

крихкість і пластичність - це не властивості матеріалу, а його стан. Поділ конструкційних матеріалів на крихкі та пластичні, що існує в інженерній термінології, є умовним і у першу чергу відображає механічні властивості цих матеріалів при невеликих швидкостях навантаження в нормальних умовах (при нормальному атмосферному тиску і при кімнатній температурі).

Тверді тіла залежно від виду руйнування ділять на три групи:

а) крихкі матеріали. Крихкими називають матеріали, які при навантаженні деформуються тільки пружно до руйнування. Не можна вказати точне максимальне значення деформації, що передує руйнуванню, але звичайно воно становить менше 1%. Зовсім крихкими в точному значенні цього слова є порівняно небагато металів. Проте крихке руйнування характерно для більшості керамічних і металокерамічних матеріалів, а так само проміжних з'єднань. Найбільш явною макроскопічною особливістю руйнування більшості звичайних крихких матеріалів, є швидке поширення тріщин у матеріалі. Однак ця особливість спостерігається не тільки в крихких матеріалах.

б) пластичні матеріали. Руйнуванню пластичних матеріалів передує значна пластична деформація. Тріщину, що звичайно поширюється повільно, можна затримати зменшивши навантаження. Більшість металів, якщо вони досить чисті, відносяться до цієї групи. Форма зламу після руйнування може відрізнятись залежно від напруженого стану (частковий злам, зріз, скручування й ін.), але усі вони характеризуються деякою незворотньою пластичною деформацією.

Наприклад, при -272°C Al чистотою 99,994 % мас. має звуження 62 %, а при наявності 1% домішок його звуження не перевищує 30 %;

в) напівкрихкі матеріали. В одних умовах руйнуються в основному крихко, в інших в'язко. Характер руйнування залежить звичайно від виду напруженого стану і таких важливих факторів, як температура та швидкість деформації. До напівкрихких матеріалів відносять метали з гексагональною і ОЦК ґратками. Поводження перших у значній мірі залежить від орієнтації, у поведженні останніх важливу роль виконують домішки.

Зовсім пластичними можна вважати лише метали із ГЦК гратками, але й серед них є виключення і їх пластичність залежить від концентрації домішок.

Ознаки зламу крихкого і пластичного матеріалу наведено у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Ознаки зламу крихкого і пластичного матеріалу

Характерні ознаки	Крихкий матеріал	Пластичний матеріал
Кристаліграфічний характер руйнування	Відкол	Зріз
Зовнішній вигляд зламу	Кристалічний	Волокнистий
Швидкість поширення тріщини	Висока (нестійка тріщина)	Низька (стійка тріщина)

До основних факторів зовнішнього впливу варто віднести температуру, час, тиск, вид напруженого стану, середовище (контакт із хімічно активною речовиною, наявність радіаційного опромінення та ін.). На характеристики пластичності та міцності впливають також конструктивні та технологічні фактори, такі як розміри твердого тіла, легування, термообробка. Вплив конструктивних і технологічних факторів пов'язаний зі структурою матеріалу, тому пояснення характеру зміни механічних властивостей вимагає фізичного підходу до розглянутого питання.

Такий підхід вперше був здійснений академіком АН СРСР Френкелем Я. І. (1894 - 1952). Ним була оцінена теоретична міцність кристала на зсув виходячи із простої моделі двох рядів атомів, що зміщуються один відносно одного під дією напружень зсуву. При цьому вийшло, що її значення становить $\tau_{теор} \approx G/2\pi$. Для заліза в якого модуль $G \approx 8 \cdot 10^4 \text{ МПа}$; теоретична міцність вийшла в 1000 разів більше реальної міцності ($\tau_{реал} \approx 10 \text{ МПа}$). Теж приблизно для міді $Cu \tau_{теор} = 7600 \text{ МПа}$, а $\tau_{практ} = 0,10 \text{ МПа}$, тобто в 76000 разів теоретична міцність більше реальної. Різниця в значеннях теоретичної та реальної міцності була пояснена тим, що деформація здійснюється послідовним проходженням дислокацій вздовж площини ковзання, а

не шляхом одночасного зсуву по всьому кристалі (як передбачалося при розрахунку) та наявністю мікроскопічних тріщин.

При зниженні температури випробувань у таких матеріалах показник зміцнення або не змінюється, або зменшується, проте несуттєво. Незначне зниження показника зміцнення спостерігається також і у випадку підвищення границі плинності після термообробки.

Температура, як правило впливає на величину границі плинності більш сильно ніж на границю міцності, тому при низьких температурах спостерігається перехід матеріалу із пластичного стану у крихкий. Першою демонстрацією такого переходу стала опублікована в 1924 р. схема А. Ф.Іоффе, отримана за результатами випробувань кристалів хлористого натрію. Схема Іоффе була підтверджена випробуваннями багатьох матеріалів. Температура, при якій границя плинності і границя міцності стають рівними, одержала назву температури крихкості $T_{кр}$. При цій температурі руйнування відбувається при відсутності макропластичних деформацій, а при температурі нижче температури крихкості стан плинності стає взагалі неможливим.

Температура крихкості залежить від швидкості навантаження, часу та виду напруженого стану.

Особливості руйнування некристалічних матеріалів

Некристалічні матеріали, зокрема скло, є абсолютно крихкими при нормальних температурах, а їх макроскопічне напруження руйнування значно менше розрахованого значення теоретичного напруження руйнування незважаючи на те, що в таких матеріалах не існує уявлень про дислокації. Це підтверджено результатами експериментів Гріффітса, який встановив, що теоретична міцність скла при кімнатній температурі становить $\approx 14000 \text{ МПа}$, у той час, як його реальна міцність не перевищує $1/50 - 1/100$ від розрахункової, тобто $\approx 150 \dots 200 \text{ МПа}$.

Для пояснення даного факту Гріффітс вперше припустив, що розходження між границями міцності абсолютно крихкого твердого матеріалу та реального матеріалу обумовлене наявністю малих тріщин, які викликають концентрацію напружень, достатніх для локального перевищення теоретичної міцності.

Так, якщо в тонкій пластині, підданій розтягуванню, є тріщина довжиною $2c$ у виді отвору (рис. 1.1) то у зв'язку з тим, що порожнина

не може нести навантаження, поблизу неї відбувається перерозподіл напружень, Напруження всередині такої тріщини дорівнюють нулю, а на ділянках матеріалу біля її країв будуть напруження, значення яких перевищує границю плинності. Тому отвори, порожнини, різного виду включення, що зменшують площу перетину і підвищують локальні напруження вище середнього рівня називаються концентраторами напружень. Ступінь підвищення напружень поблизу концентратора описують коефіцієнтом концентрації напружень α .

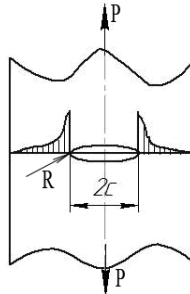


Рисунок 1.1 – Елюра напружень розтягнення у тонкій пластині біля концентратора напружень у виді тріщини

Напруження поблизу гострих країв концентратора зростає до величини

$$\sigma_{\text{конц}} = \alpha \cdot \sigma, \quad (1.1)$$

де, $\sigma_{\text{конц}}$ - напруження, яке виникає під дією зовнішніх чинників.

Виявилось, що величина «концентрованого» напруження, визначається формою концентратора, його розмірами та радіусом кривизни його країв. Для еліптичного отвору (цей отвір вважається тріщиною) коефіцієнт концентрації напружень становить

$$\alpha = 1 + 2\sqrt{\frac{C}{R}}, \quad (1.2)$$

де C - напівдовжина тріщини; R - радіус кривизни.

Якщо роль концентратора напружень виконує тріщина, то положення загострюється, оскільки радіус кривизни при її вершині дуже малий і може дорівнювати міжатомній відстані. Це може

привести до підвищення напруження біля вершин тріщини до значення, достатнього щоб викликати розрив міжатомних зв'язків, що приводить до збільшення її довжини, а відповідно до формули 1.2, і коефіцієнта α та як наслідок до подальшого підвищення $\sigma_{\text{конц}}$ (формула 1.1).

Наприклад, тріщина довжиною 2 мм із радіусом кривизни 0,1 нм підвищує напруження в 201 раз.

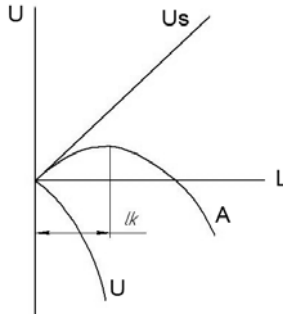
Таким чином, тріщини приводять до послідовного руйнування міжатомних зв'язків при таких значеннях середніх напружень які у сотні разів менше теоретичної міцності.

Коли в пластині виникає тріщина пружна енергія змінюється у бік її зменшення. Це легко зрозуміти, якщо ми врахуємо, що коли тріщина розділяє пластину навпіл, обидві половини будуть розряджені і їх пружна деформація зникне.

Оскільки при виникненні тріщини утворюються дві нові поверхні, а поверхня завжди має надлишкову енергію, то загальне значення енергії буде різницею між значенням пружної енергії, що вивільнилася, і енергією, яка додалася і пов'язана з утворенням двох нових поверхонь тріщини. Ці зміни показані на рисунку 1.2. Як видно з вказаного графіка, утворення дрібних тріщин довжиною менше lk енергетично не вигідно (крива A підвищується). Але якщо в матеріалі вже є готові тріщини довжиною більше lk , то їх подальший ріст може стати енергетично вигідним, оскільки коли довжина тріщини, що поширюється, починає перевищувати значення lk , сумарна енергія зменшується.

При збільшенні довжини тріщини більше за значення lk (рис. 1.2) зовнішнє навантаження вже не потрібне. Для завершення процесу руйнування досить тієї пружної деформації (а отже енергії), що була накопичена в пластині до моменту досягнення тріщиною критичної довжини, а саме lk (рис. 1.2).

Теорія Гріффітса пояснила неможливість зупинки процесу росту тріщини, якщо він вже пройшов критичну точку. Вона дозволила оцінити ті граничні розміри тріщин, з якими ще може працювати матеріал при певних напруженнях $\sigma_{\text{кр}}$.



U_s – енергія, що пов’язана з утворенням двох нових поверхонь,
 A – зміна загальної енергії, U – пружна енергія, що вивільнюється
 Рисунок 1.2 – Зміна енергії при рості тріщини

Теорія Гріфітса та наступний її розвиток дозволяє встановити зв’язок між довжиною тріщини та значенням напруження ($\sigma_{кр}$) яке ще не буде небезпечним. Припустимо, що технологія одержання певного матеріалу не забезпечує відсутності тріщин у виробі. Наприклад, зварювання часто викликає утворення непроварів та неметалічних включень. На виробництві для відбракування деталей із подібними дефектами використовують методи дефектоскопічного контролю. Проте кожен метод дефектоскопії має деякий поріг чутливості, тому можна із впевненістю стверджувати лише те, що у виробі не буде дефектів більше певного розміру, який перевищує чутливість застосованого методу дефектоскопії. Тоді, це граничне значення величини дефекту і буде визначати критичне значення напруження $\sigma_{кр}$. Маючи таку інформацію, конструктор, в свою чергу, може вибрати форму та розміри виробу таким чином, щоб при відомому робочому навантаженні напруження в будь-якому перетині були менші критичного значення $\sigma_{кр}$.

На перехід матеріалів з в’язкого у крихкий стан впливають умови випробування, зокрема швидкість навантаження та температура. Для стандартних швидкостей деформації $10^{-2} \dots 10^{-3} \text{ с}^{-1}$, якщо в матеріалі не відбуваються фізико-хімічні перетворення, то існує аналогія впливу швидкості та температури. З підвищенням швидкості та зниженні температури збільшується границя плинності і відповідно підвищується схильність до крихкого руйнування. При цьому вплив швидкості на величини граничних напружень в порівнянні з впливом температури завжди слабкіше.

При швидкостях деформації порядку 10^5 с^{-1} процес деформування стає адіабатичним. Через недостатній час для відводу тепла, різко зростає температура матеріалу, а сам матеріал проявляє надпластичність. Цей ефект використовується в технології зварювання вибухом та у технології різання металів.

Подальше збільшення швидкості деформації до $10^6 \dots 10^7 \text{ с}^{-1}$ приводить до того, що пластичні деформації поширюються з меншими швидкостями, ніж пружні і відбувається крихке руйнування (руйнування відколом), зокрема при імпульсному нагріванні поверхні лазером.

При таких високих швидкостях, коли час навантаження стає близьким або кратним періоду власних коливань структурних елементів, стають помітними інерційні ефекти. В цьому випадку опір залежить від щільності матеріалу і його структури.

Одновременна зміна температури і швидкості деформування приводить до більш сильної зміни механічних властивостей, ніж сума окремих ефектів, температурного і часового. Це свідчить про існування температурно-часового ефекту взаємодії.

Завдання на підготовку до лабораторної роботи

Для виконання лабораторної роботи та пояснення результатів експериментів необхідно пропрацювати такі питання:

1. Кристалічна і аморфна будова матеріалів.
2. Види напружень, пружна і пластична деформація металів.
3. Руйнування металів. Механізми утворення тріщин.
4. Механічні властивості, що визначаються при статичних випробуваннях.
5. Схема, що описує зміну механізму руйнування під впливом температури.

Контрольні питання

1. Яка різниця у будові кристалічних та аморфних матеріалів?
2. Які види дефектів зустрічаються у кристалічних та аморфних матеріалах, що знижують теоретичну міцність матеріалів і чому?
3. Чим відрізняється істинне напруження від умовного?

4. Що таке концентратори напружень, яким параметром оцінюють їх ступінь дії та чим вони небезпечні?
5. Які процеси відбуваються в металі при пружній деформації?
6. Яким чином відбувається пластична деформація?
7. Чим пояснюється наклеп металу в процесі деформування?
8. Які ознаки крихкого і в'язкого руйнування?
9. Поясніть механізм утворення та поширення тріщин.
10. Які особливості структури в'язкого і крихкого зламів?
11. В яких умовах частіше спостерігається крихке руйнування і чим це можна пояснити?
12. Охарактеризувати схему, що описує зміну механізму руйнування під впливом температури.
13. Якому виду руйнування притаманне більше значення поглиненої енергії?
14. Якому виду руйнування притаманне більше значення швидкості поширення тріщин?
15. Поясніть яким чином в'язке і крихке руйнування пов'язані з кристалографічними площинами?

Матеріали і устаткування

Набір зразків з крихких та в'язких матеріалів при нормальних умовах, розривна машина, обладнана піччю. Мікроскоп. Деталі після передчасного руйнування від однократного навантаження.

Вказівки з техніки безпеки

Роботу виконують з дозволу викладача у відповідності з інструкціями із ТБ (додаток А).

Порядок виконання лабораторної роботи

Ознайомитися зі зразками крихких та в'язких матеріалів при звичайних умовах.

Провести випробування зразків на розтягнення при температурах вищих та нижчих температури крихкості $T_{кр}$.

Визначити характеристики механічних властивостей матеріалів, при вказаних температурах. Результати випробувань занести у таблиці 1.2 та 1.3. Провести дослідження зламів зразків та деталей. Визначити характер руйнування. Результати занести у таблицю 1.4.

Таблиця 1.2 – Залежність границі плинності та міцності від температури випробувань для торійованих вольфрамів сплавів

Температура випробувань, °C	Марки вольфрамів сплавів					
	ВР20Т2		ВР10Т2		ВТ15	
	$\sigma_{пл}$, МПа	$\sigma_{в}$, МПа	$\sigma_{пл}$, МПа	$\sigma_{в}$, МПа	$\sigma_{пл}$, МПа	$\sigma_{в}$, МПа
20						
100						
200						
300						
400						
500						
600						

Таблиця 1.3 – Залежність звужування (ψ) та видовження (δ_5) від температури випробувань

Температура випробувань, °C	Марки вольфрамів сплавів					
	ВР20Т2		ВР10Т2		ВТ 15	
	ψ , %	$\delta_{5, \%}$	ψ , %	$\delta_{5, \%}$	ψ , %	$\delta_{5, \%}$
20						
100						
200						
300						
400						
500						
600						

Таблиця 1.4 – Ознаки зламу сплаву ВТ15 у крихкому і пластичному стані при певній температурі.

Ознаки руйнування		
Кристаліграфічний характер руйнування		
Зовнішній вигляд зламу		
Швидкість поширення тріщини		

Зміст звіту

Мета роботи, загальні відомості.

За даними таблиці 1.2 побудувати графіки залежностей механічних властивостей від температури випробувань, із застосуванням теоретичних відомостей пояснити їх характер, визначити $T_{кр}$. Проаналізувати результати, наведені у таблицях 1.3 та 1.4, описати виявлені закономірності. Зробити висновки за результатами проведених досліджень.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

Особливості поширення тріщин у кристалічних матеріалах при крихкому та в'язкому руйнуванні

Мета роботи: Дослідити особливості поширення тріщин у кристалічних матеріалах при крихкому та в'язкому руйнуванні

Загальні відомості

Теорія крихкого руйнування Гріффітса добре підтверджується експериментами на аморфних матеріалах типу скла при невисоких температурах, що забезпечує досить повне гальмування пластичної деформації. Проте при переході до металів вона дає результати, які не відповідають реальності, хоча їх поведження при крихкому руйнуванні якісно не відрізняється від поведження скла. Причина цієї невідповідності згідно Оровану, у тому, що пружна енергія, яка вивільнюється при рості тріщини, витрачається не тільки на утворення нових поверхонь, але й на пластичну деформацію. Тому що, біля вершини тріщини утворюються високі напруження і деякий об'єм металу завжди піддається пластичній деформації. Оскільки при поширенні тріщини у кристалі в зоні високих напружень біля її вершини будуть виникати все нові джерела дислокацій, які тріщина змусить працювати, тобто буде відбуватись пластична деформація у вказаному місці. Коли тріщина розірве метал, поверхня зламу буде пластично деформована. Тому при крихкому руйнуванні металів пластично деформований шар на поверхні зламу існує завжди. Залежно від умов його товщина може мінятися від часток мікрометра до десятків мікрометрів і більше.

Оскільки на пластичну деформацію витрачається певна робота, то товщина деформованого шару буде впливати на загальні енерговитрати, пов'язані з руйнуванням. Чим швидше поширюється тріщина, тим тонше деформований шар і тим у меншому ступені він деформований, тому що потрібно на приведення в дію дислокаційних джерел витратити певну енергію, а це потребує деякого часу.

Орован до величини γ^S (енергії поверхонь, що утворюються) у формулі Гріффітса додав ще один доданок γ^P – енергію яка витрачається на пластичну деформацію (так звана ефективна

поверхнева енергія) шару матеріалу, що прилягає до нової поверхні, що утворилася

$$\sigma = \sqrt{\frac{E(\gamma^S + \gamma^P)}{C}}, \quad (2.1)$$

де C – довжина тріщини, E – модуль Юнга.

Оскільки γ^P на 2-3 порядки більше γ^S , то першим доданком можна нехтувати і формула Гріффітса-Орована набуває виду:

$$\sigma = \sqrt{\frac{E\gamma^P}{C}}. \quad (2.2)$$

Величина γ^P не залишається постійною в процесі росту тріщини. При поширенні тріщини, у зв'язку з ростом її довжини і відповідно підвищенням концентрації напружень, значення γ^P зменшується. Проте навіть у самих несприятливих умовах вона залишається вище γ^S . При швидкості 24 км/год за теоретичним розрахунком $\gamma^S = \gamma^P$. Проте тріщина з такою швидкістю рухатися не може. Її гранична теоретична швидкість становить $0,5v$ звуку в металі, тобто 2,5...3 км/с.

Є багато експериментальних даних які підтверджують, що крихкому руйнуванню в кристалічних матеріалах передують пластична деформація, незважаючи на те, що шлях руху дислокацій безпосередньо перед тріщиною, що поширюється, може бути невеликим.

Вважається, що за утворення зародків тріщин відповідальна взаємодія дислокацій. На цій підставі був запропонований ряд можливих механізмів, (модель Стро-Мотта, механізм Коттрелла), деякі з яких знайшли експериментальне підтвердження.

Відповідно до моделі Коттрелла утворення мікротріщин відбувається в площині перпендикулярній до осі розтягнення. Це підтверджується експериментальними даними.

Особливості крихкого руйнування

Практично в будь-якому матеріалі, який би він не був пластичний при статичних випробуваннях, може відбутися крихке руйнування, якщо в ньому при навантаженні одночасно утвориться

багато активних дефектів – недосконалостей кристалічної ґратки, наприклад, дислокацій.

Тріщина стає нестабільною і починає поширюватися, коли її довжина перевищує критичне значення за рівнянням Гріффітса. Швидкість поширення тріщини – $V_{\text{повн}} = 0,38C_0$, де C_0 – швидкість поширення пружних подовжніх хвиль у матеріалі.

При такій швидкості поширення тріщини значення напруження, достатнього для руйнування атомних зв'язків біля вершини тріщини, досягаються за час одного періоду коливань атомів. Швидкості поширення тріщин у різних матеріалах наведено у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Швидкості поширення тріщин у різних матеріалах

Матеріал	Швидкість поширення тріщини, 10^{-3} м/сек
Сталь	1,0...1,8
Скло	1,5...2,0
Целюлоза	0,3...0,4
Силіконова гума	0,007...0,008

Фінкель В.М. визначив методом прискореної кінозйомки, що в крихкому металі тріщина на докритичній стадії процесу руйнування рухається зі швидкістю ~ 1 мм/год, а після досягнення критичного розміру – 10000 км/год.

Приклади:

а) танкер розламався навіпіл у тиху погоду. Тріщина зародилася біля гострого кута люка, моментально проскочила по палубі, а потім по обох бортах до самого кіля.

б) досить страшну картину показують випадки крихкого руйнування магістральних газопроводів. Тріщина поширюється уздовж трубопроводу зі швидкістю реактивного літака, пробігаючи без зупинки десятки кілометрів.

Такі руйнування приносять колосальний збиток і часто приводять до людських жертв.

Крихіткі злами, як правило, виникають від дії нормальних напружень, чим визначається їх макро- і мікроорієнтування, проте

відомі випадки крихкого руйнування і від дотичних напружень, що частіше спостерігається в литих металах і сплавах.

У багатьох кристалічних матеріалах при низьких температурах порушення суцільності відбувається у формі крихкого руйнування або відколу. Більш схильні до крихкості кристали з іонним і ковалентним зв'язками.

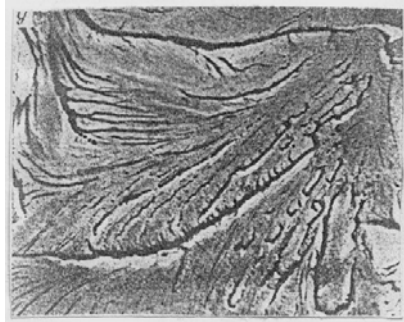
Відкол, як вид руйнування уявляє собою роз'єднання по певним кристалографічним площинам, що відбувається в металах, які мають невелику здатність до поперечного ковзання або не мають її зовсім.

Руйнування у виді істинного відколу спостерігається в металах з ОЦК граткою, зокрема в Fe, Mo, Cr, V, W, і Ta, де його поява пов'язана з наявністю атомів втілення. У металах із ГЦК граткою такого руйнування не виявлено. У металах із ГЦП граткою (Zn, Mg, Ti, Be) подібний вид руйнування виявлено при від'ємних температурах. Метали з іншими типами кристалічної ґратки часто є крихкими - Bi, Sb (ромбоєдрична). Неможливо встановити єдиний критерій, який би дозволив визначити площини руйнування, наприклад, як площина з найбільш щільним пакуванням або з найменшою поверхневою енергією. Проте метали з подібними кристалічними ґратками поведуться однаково. Типові площини відколу металів, що мають різні типи ґраток, наведено у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Типові площини відколу деяких металів

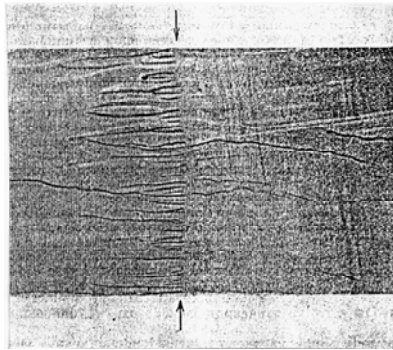
Метал	Кристал. ґратка	Площина руйнування	Метал	Кристал. ґратка	Площина руйнування
Fe	ОЦК	(001)	Zn	ГЦП	(0001)
Mo	ОЦК	(001)	Be	ГЦП	(0001)
V	ОЦК	(110)	Sb	Ромбоєдрична	(111)

Розвиток крихких тріщин відбувається з великою швидкістю і це повинно було б приводити до утворення двох ідеально плоских поверхонь (площин відколу). У деяких випадках дійсно утворюються дзеркальні поверхні, проте частіше на поверхні зламу чітко виявляються нерівності - так званий, струмковий або річковий візерунок (рис. 2.1, 2.2).



×100

Рисунок 2.1 – Струмковий злам



×100

Рисунок 2.2 – Поверхня руйнування монокристалу цинку з «струмковим візерунком», отримана при температурі випробування -196°C

Можливі причини утворення нерівностей:

- якщо зародкова тріщина перебуває не в площині відколу, то вона поширюється як би сходами, тобто площина поширення тріщини розбивається на ряд ділянок, для того щоб частина з них розташовувалася в площинах з найменшою енергією;

- якщо тріщина зустрічає на своєму шляху значне число гвинтових дислокацій, то відповідно зростає число сходинок відколу.

Існує зв'язок між рельєфом «струмкового візерунка» і швидкістю поширення тріщини – чим з меншою швидкістю рухається тріщина, тим більш рельєфний утворюється візерунок.

На поверхні дуже крихких зламів можуть спостерігатися лінії Вальнера (рис.2.3), що уявляють собою системи паралельних сходів, які пересікаються. Лінії Вальнера утворюються внаслідок взаємодії фронту тріщини і фронту пружної хвилі, відбитої від якого-небудь

дефекту або перешкоди для розвитку тріщин. Вони частіше спостерігаються у крихких неметалевих матеріалах.

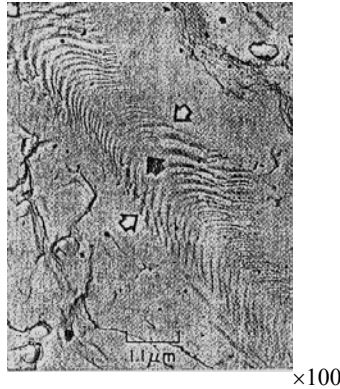


Рисунок 2.3 – Лінії Вальнера (між білими стрілками) на поверхні руйнування алюмінієвого сплаву

При злитті магістральної (основної) тріщини з додатковими тріщинами по площинам двійникування у зламі утворюються «язички», при злитті по лініях ковзання - «трісочки», які уявляють собою дуже тонкі відщиплення металу та мають чітко виражений кристалографічний напрямок.

Міжзеренне руйнування є мало пластичним. Найбільш очевидна ознака міжзеренного руйнування полягає в наявності рельєфу по межах зерен. Крихке міжзеренне руйнування гладких зразків при статичному навантаженні при 20°C спостерігається, як правило, внаслідок окрихчення границь зерен частинками крихкої фази і, або домішок (рис.2.4,.).

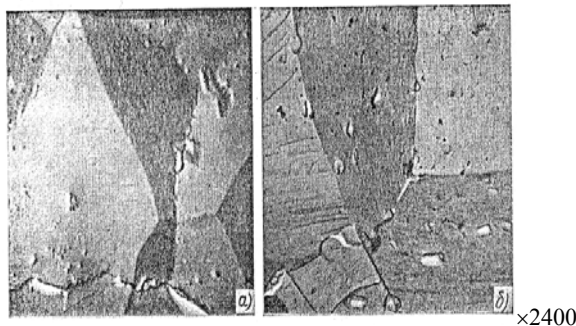


Рисунок 2.4 – Мікročастинки крихкої фази, які розташовані по межах зерен

Можливі типи в'язкого руйнування

В'язке руйнування розвивається звичайно зі значно меншою швидкістю, ніж крихке. Напруження необхідне для його розвитку, перевищує значення границі плинності матеріалу, котра використовується при розрахунках міцності деталей і конструкцій. Тому випадки пластичного руйнування в практиці експлуатації порівняно рідкі.

Пластичне руйнування характеризується такими особливостями:

- більша величина пластичної деформації необхідна для поширення тріщини;
- процес може бути зупинений на будь-якій стадії, якщо напруження, що діє, знизиться до значення нижче напруження плинності матеріалу перед тріщиною.

При розтягненні в полікристалах можливі кілька типів пластичного руйнування. Шийка у виді точки спостерігається у високопластичних металах із ГЦК граткою, звуження поперечного перерізу перед руйнуванням може досягати майже 100%.

Чашковий злам, тобто злам конус – чашечка, спостерігається в менш пластичних полікристалічних металах і є найбільш характерним.

При однократному навантаженні до значення тимчасового опору, характерним є поширення тріщини по тілу зерна, але в деяких випадках тріщина може поширюватись і по границям зерен.

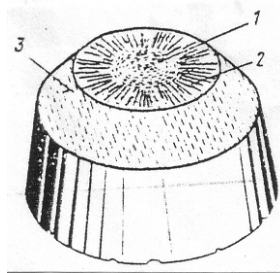
Залежно від напрямку дії максимальних напружень, що розтягують, злам може мати волокнисту або матову поверхню, сильно шорсткі поверхні руйнування при цьому поширюються перпендикулярно напрямку дії напружень, або шовковисту поверхню, коли поширення руйнування збігається з напрямком дії дотичних напружень.

Макроскопічний вид поверхні зламу використовують для оцінки ступеня в'язкості металу. Відповідно до теорії механіки руйнування, в'язкість є тією механічною властивістю, що найбільш тісно пов'язана з опором поширенню тріщин.

Усе, що визначає величину в'язкості, а саме: природа матеріалу, з якого виготовлена деталь, величина і форма останньої, температура, середовище та спосіб навантаження змінює вид зламу. Тому характерні риси будови зламів кожного сплаву залежать від режиму термічної обробки, форми зразка або деталі та ін.

В'язким, як і іншим зламам, властива неоднорідність будови. Навіть у межах одного зерна руйнування відбувається неоднорідно, наприклад, частково по площині відколу з утворенням гладкої блискучої фасетки, а частково по іншим поверхням, що помітно деформуються у процесі руйнування.

У циліндричних зразках після випробування на розтяг на поверхні зламів, зазвичай, утворюються три характерні зони: волокниста, радіальна і зона зрізу (рис. 2.5).



1 – волокниста, 2 – радіальна, 3 – зона зрізу

Рисунок 2.5 – Схематичне зображення зон типового зламу, що утворюються при розтягненні гладкого циліндричного зразка

Волокниста зона – відповідає області повільного росту тріщини. Вказана зона розташована в центрі зламу, а місце зародження тріщини, як правило, розташоване у центрі цієї зони. Це місце звичайно можна визначити за наявністю несучільності, включення або скупчення включень. При різних рівнях міцності і температурах випробувань поширення тріщини у волокнистій зоні, частіше за все, відбувається у результаті злиття мікропор при руйнуванні перемичок між ними, що можна побачити за допомогою електронного мікроскопа.

Радіальна зона – при переході тріщини від повільного росту до швидкого або нестабільного поширення утворюються радіальні рубці, які орієнтовані в напрямку поширення тріщин. Вони починаються або від периферії волокнистої зони, або при відсутності цієї зони - від місця зародження тріщини. в якій сходяться радіальні рубці, точці зародження тріщини.

Зона зрізу – складається з рівної кільцеподібної ділянки, суміжної з вільною поверхнею зразка. Величина зони зрізу залежить

від напруженого стану та властивостей металу. Відсутність цієї зони можлива тільки коли метал перебуває в надзвичайно крихкому стані.

Приклад такого зламу після випробування на розтягання при -196°C показаний на рисунку 2.6. Він складається з радіальної зони та зони зрізу. При цьому радіальні рубці займають майже всю площу, за винятком вузької смужки зони зрізу.

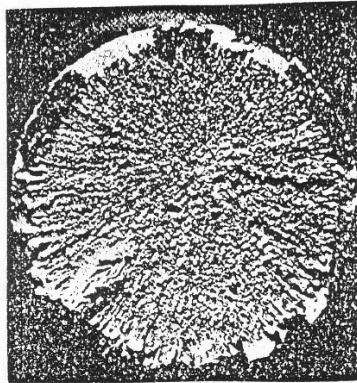


Рисунок 2.6 – Злам зразка зі сталі 45 зі структурою відпущеного мартенситу

Злами, що мають тільки одну зону, утворюються лише за умови високої в'язкості або навпаки крихкості матеріалу.

Оскільки від форми деталі або зразка для випробувань залежить напружений стан, ці параметри впливають на вид поверхні та співвідношення зон зламу. Наприклад, волокниста зона у прямокутного зразка може бути за формою близькою до еліптичної з великою віссю, паралельною довгим сторонам прямокутника. У зламах зразків дуже тонких перетинів, коли реалізується плосконапружений стан, радіальна зона може бути відсутньою.

Багато металів (Fe, Mo, W, Zn й ін.), що мають ОЦК і ГПУ кристалічні ґратки, залежно від температури можуть руйнуватися як в'язко, так і крихко. Наприклад, зниження температури спричиняє перехід від в'язкого до крихкого руйнування. Це явище одержало назву холодноламкості.

Температура переходу металу від в'язкого руйнування до крихкого називається критичною температурою крихкості, або порігом холодноламкості ($t_{n.x.}$). Чим нижче поріг холодноламкості,

тим більший запас пластичності за інших рівних умов. Ця температура чутлива до ряду параметрів, що характеризують метал, найбільш важливими з яких є ступінь чистоти, структура, процес виплавки і ін. Збільшує схильність до крихкого руйнування підвищення швидкості деформації, наявність концентраторів напружень, збільшення розмірів виробу.

При випробуванні полікристалічних зразків з конкретних металів і сплавів, як правило не існує чіткої температурної границі переходу, а є певний температурний інтервал, у якому характер руйнування поступово змінюється і спостерігається помітний розкид значень вимірюваної механічної характеристики. У цій температурній області поступово змінюється і характер зламу.

Існує кілька критеріїв для практичного визначення температури холодноламкості, що характеризує схильність матеріалу до крихкого руйнування:

- величина ударної в'язкості;
- вид зламу;
- площа зламу, зайнята кристалічними ділянками.

На значення температури переходу впливає режим термічної обробки та технологія виплавки сталі. Дані щодо температур переходу марки Ст 3 у крихкий стан наведено у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Вплив режиму термічної обробки та технології виплавки сталі Ст3 на температуру переходу її у крихкий стан

Сталь	Температура переходу, °С	
	Початок	Кінець
Кипляча гарячекатана	+100	0
Кипляча нормалізована	+40	-20
Спокійна гарячекатана	+20	-40
Спокійна нормалізована	0	-60
Примітки. 1. Початок переходу – при температурі вище зазначеної злам повністю в'язкий. 2. Кінець переходу – при температурі нижче зазначеної злам повністю крихкий.		

На значення ударної в'язкості також впливає товщина прокату (табл. 2.4).

Таблиця 2.4 – Значення ударної в'язкості сталі Ст3 в залежності від товщини прокату

Товщина листа, мм	Ударна в'язкість, Дж/ см ² при температурі випробувань, °С	
	+20	-20
3 ... 4,9	108	49
26 ... 40	88	0

Завдання на підготовку до лабораторної роботи

Для виконання лабораторної роботи та пояснення результатів експериментів необхідно пропрацювати такі питання:

1. Механізми утворення та поширення тріщин.
2. Вплив умов на виникнення крихкого руйнування.
3. Особливості крихкого руйнування, що відбувається по тілу зерна і по границям зерен.
4. Будова зламів при крихкому руйнуванні.

Контрольні питання

1. Поясніть причини утворення та поширення тріщин при крихкому руйнуванні.
2. Поясніть механізми утворення та поширення тріщин.
3. Опишіть особливості зламів при крихкому руйнуванні, утворення язичків, міжзеренний злам, руйнування по границям субзерен, руйнування по міжфазним границям.
4. Поясніть яким чином на характер крихкого руйнування впливає температура, товщина прокату, швидкість навантаження?
5. Охарактеризуйте параметри, якими оцінюють схильність матеріалу до крихкого руйнування?
6. Опишіть зв'язок між макро- і мікробудовою зламів.
7. Поясніть чому в'язке руйнування відбувається з меншою швидкістю ніж крихке?
8. Поясніть при яких напруженнях відбувається в'язке руйнування?
9. Опишіть особливості в'язкого руйнування.
10. Охарактеризуйте типи в'язкого руйнування.

11. Охарактеризуйте типи поверхонь зламів що утворюються при в'язкому руйнуванні.

12. Які чинники впливають на вид поверхні зламу в'язкого руйнування.

13. Опишіть утворення характерних зон на зламі при в'язкому руйнуванні.

14. Наведіть приклади впливу різних чинників на значення температури переходу сталі із пластичного стану у крихкий.

Матеріали і устаткування

Набір зразків зі зламами. Мікроскоп, лупа.

Вказівки з техніки безпеки

Роботу виконують з дозволу викладача у відповідності з інструкціями із ТБ (додаток А).

Порядок виконання лабораторної роботи

Провести дослідження зламів після крихкого руйнування. Описати їх особливості. Пояснити причини утворення різних видів візерунків на поверхні даних зламів. Оформити звіт.

Порядок оформлення звіту

Мета роботи. Охарактеризувати основні види зламів при крихкому руйнуванні. Оцінити схильність до крихкого руйнування різних сплавів та сталей. Зробити висновки результатів даних досліджень.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

Дослідження причин зародження тріщин. Руйнування

Мета роботи: дослідити причини зародження тріщин руйнування та закономірності розташування їх місць на поверхнях зламів.

Загальні відомості

Причиною руйнування навантажених деталей часто є наявність внутрішніх або поверхневих несучільностей таких як – заходи, волосовини, тріщини, пористість, включення і ін. Вони часто служать місцями зародження втомного руйнування або корозійного розтріскування, внаслідок того, що вони підвищують локальні напруження (викликають концентрацію напружень) та чутливість до агресивного впливу навколишнього середовища.

Закати це прямолінійні дефекти у вигляді тонких тріщин які, як правило, проходять по поверхневі по всій довжині прокатоної заготовки.

На поперечних макрошліфах і мікрошліфах видна характерна особливість закату – розташування його під гострим кутом до поверхні металу.

На мікрошліфах характерною ознакою закату є те, що його кінець зазвичай не розгалужений і огинається волокном. Часто даний дефект заповнений окалиною, а метал його стінок знеуглецьований. Закати виявляються при зовнішньому огляді прокату або при осадці зразків у гарячому або холодному стані. Їх наявність контролюється методами неруйнівного контролю.

Волосовини можуть бути внутрішніми і зовнішніми. Дефект уявляє собою скупчення неметалічних включень, що попадають у метал, зокрема шлаки, вогнетриви, феросплави і ін. У деформованому металі забруднення витягаються уздовж напрямку деформації і утворюють ниткоподібні дефекти, які називають волосовинами. На поздовжніх мікрошліфах волосовини уявляють собою рядки неметалічних включень.

При руйнуванні у зламі на наявність закату або волосовини вказує наявність плоскої ділянки, яка при візуальному огляді виглядає чорною або тьмяно-сірою і не має рельєфів руйнування. Така область (ділянка) утворюється в результаті розшаровування двох металевих

поверхонь, що перебували в контактi, але не були зв'язаними (або були не мiцно зв'язаними) мiж собою.

На рисунку 3.1, як приклад, наведено злам колiнчатого валу. В даному випадку волосовина, яка знаходиться мiж краєм деталi i лiнiєю, вказаною стрiлками, iнiцiувала зародження втомної трiщини.

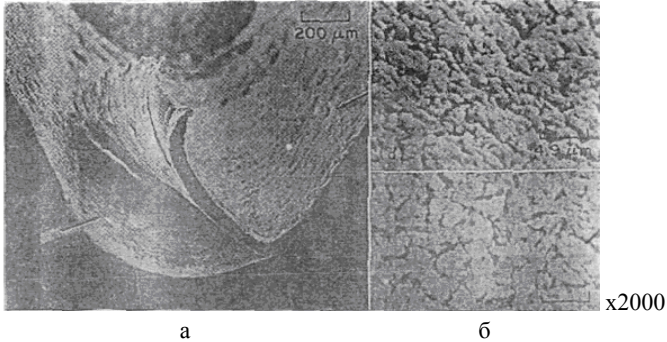


Рисунок 3.1 - Втомне руйнування шокі колiнчатого валу вiд волосовини

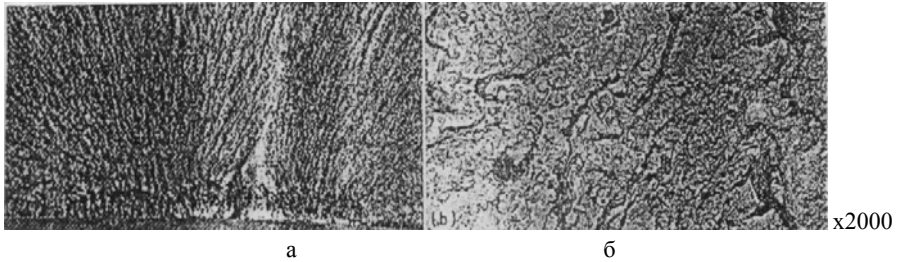
На рисунку 3.2. показаний закат у шпильцi, що утворювався пiд час накатки рiзби. Закат послужив iнiцiатором корозійного розтрiскування, яке привело до руйнування. Обидвi поверхнi сильно окисленi, що свiдчить про утворення даного дефекту до термiчної обробки шпильки.

Трiщини. Причина зародження висiдної трiщини i її розмiр досить важливи для встановлення критичної довжини трiщини, по досягненню якої починається її нестабiльний рiст. Найчастiше до експлуатацiйних ушкоджень приводять термiчні трiщини, що утворюються пiд дiєю термiчних i фазових напружень.

Поверхня висiдної трiщини в зламi, як правило, має мiжкристалiчний рельєф. Якщо трiщина розкрилася у бiк зовнiшньої поверхнi зразка так, що в неї можуть проникати повітря, вода i ін. то вона звичайно набуває темного кольору, внаслiдок окиснення. Як приклад на рисунку 3.3 показано трiщину вiдколу, яка має окислену поверхню.



а - закат у різьбі шпильки , x100; б- окисленні поверхні
Рисунок 3.2 – Стан шпильки після обробки



а - тріщина відколу, x100;
б - продукти корозії на поверхні руйнування
Рисунок 3.3 – Стан поверхні зразка

Включення, що діють як несучільності, зокрема оксиди, сульфідів, силікатів і ін. можуть ініціювати руйнування. Причиною є те, що при відносно низьких деформаціях відбувається відділення їх від матриці або руйнування самих включень, що приводить до утворення мікропор які діють як несучільності.

Пористість, це наявність у металі дрібних порожнин найбільш часто зустрічається в литому стані матеріалу або у зварених з'єднаннях, а також залишкова пористість від зливка може зберігатися і після кування. Поверхні тріщин, що поширюються по ділянках з пористістю характеризується наявністю великої кількості дрібних поглиблень або наявністю ділянок, що мають вид дендритної структури. Поверхні руйнування по ділянках значної пористості

виглядають «забрудненими» або «закопченими» через велике число дрібних пор, схожих на чорні точки.

До дефектів, що можуть ініціювати руйнування, також відносяться: ліквіація та несприятливе орієнтування зерен.

Дуже важливо правильно визначити місце розташування вихідної тріщини, тому що це дозволяє встановити, що ж ініціювало руйнування.

Радіальна зона зламів прямокутних зразків, ширина яких значно більше товщини, мають вид ялинки або шеврона. Вершини V-подібних шевронних візерунків спрямовані у бік, протилежний напрямку поширення тріщини, тобто вершини вказують у той бік, у якому ймовірно розташоване місце зародження тріщини руйнування.

На місце зародження тріщини руйнування вказують лінії зупинки фронту тріщини. Місце зародження руйнування, зазвичай розташоване на увігнутій стороні кривої фронту тріщини.

На рисунку 3.4 показано втомне руйнування зуба шестерні, що відбулося з – за наявності на поверхні дефекту кування. Близько місця зародження тріщини видні лінії втоми (вказано стрілочкою). На деякій відстані видні струмкові візерунки, викликані відколом.

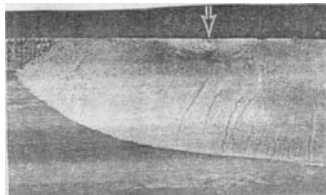
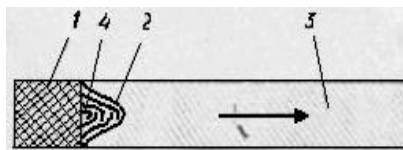


Рисунок 3.4 – Поверхня втомного руйнування зуба шестерні

На рисунку 3.5 зображено схему зародження та поширення подібних тріщин.



1 – поверхня зрізу; 2 – волокниста зона; 3 – зона зрізу;
4 – місце зародження тріщини руйнування

Рисунок 3.5 – Схема місця зародження та поширення тріщини

Іноді плоска поверхня близько місця зародження тріщини руйнування безпосередньо переходить у зону повного зрізу. На поверхні зламу утворюється трикутна область, яка вказує напрямок поширення тріщини.

Зазвичай місця зародження тріщин руйнування розташовані на вільних поверхнях деталей, чому сприяє наявність концентраторів напружень та агресивне середовище.

У поверхово-зміцнених деталях руйнування в зоні з високою твердістю зупиняється в більш м'якій серцевині. У цих же деталях, що зазнають згину або крутінню місце зародження тріщини руйнування може виникнути на границі поділу між зміцненим шаром та більш пластичною і менш міцною серцевиною, у результаті концентрації напружень у місцях перепадів міцності.

Завдання на підготовку до лабораторної роботи

Для виконання лабораторної роботи та пояснення результатів експериментів необхідно пропрацювати такі питання:

1. Дефекти, що можуть ініціювати руйнування.
2. Закономірності зародження тріщин.
3. Типові місця зародження тріщин та методи їх визначення.
4. Макроструктурний аналіз.

Контрольні питання

1. Пояснити, чому несучільності сприяють процесу руйнування?
2. Якими методами доцільно виявляти дефекти типу несучільностей?
3. Охарактеризувати дефекти – закат та волосовина. Пояснити механізм їх впливу на процес руйнування.
4. Пояснити механізми утворення термічних тріщин та впливу на процес руйнування.
5. Пояснити механізми впливу неметалевих включень на процес руйнування.
6. За якими ознаками зламу можна визначити місця зародження тріщин?

7. З яких причин тріщини зароджуються на границі поділу між зміцненим шаром та більш пластичною і менш міцною серцевиною?

Матеріали і устаткування

Набір зламів зразків і деталей, мікроскоп.

Вказівки з техніки безпеки

Роботу виконують з дозволу викладача у відповідності з інструкціями із ТБ (додаток А).

Порядок виконання лабораторної роботи

Провести дослідження зламів зруйнованих деталей. Встановити місця зародження тріщин та причини (дефекти), що ініціювали їх появу.

Порядок оформлення звіту

Мета роботи, загальні відомості. Дати коротку характеристику основним дефектам, що можуть ініціювати зародження тріщин. Пояснити вплив виявлених дефектів на закономірності зародження тріщин. Надати рекомендації по їх усуненню. Зробити висновки щодо отриманих результатів.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4
Приклад виконання експертної роботи на тему
«Дослідження причин руйнування
колінчатого валу тепловозу»

Мета роботи: встановлення причин руйнування колінчатого валу дизельного двигуна тепловозу, що відпрацював половину планового ресурсу.

Загальні відомості

На Запорізькому феросплавному заводі (ЗФЗ) при штатній роботі тепловозу відбулося руйнування колінчатого валу дизельного двигуна, який відпрацював менше 50 % планового ресурсу. Тому за ініціативи ЗФЗ з метою встановлення причин руйнування вказаної деталі була проведена дана робота.

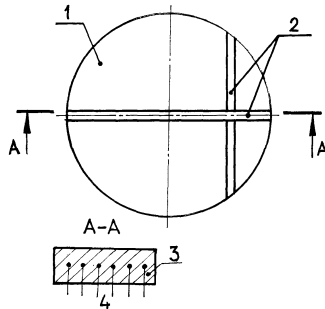
Матеріал та методика проведення досліджень

Згідно наданого креслення дана деталь виготовляється зі сталі 35ХНЗМА. Її термічна обробка включає термополіпшення на твердість 269...375 НВ і азотування на глибину 0,3 мм. Крім того вимогами креслення не допускаються такі дефекти як флокени, тріщини, плівки, розшарування, усадочна пористість, скупчення неметалічних включень, забоїни розкуті й розкатані пухирі. Максимальний розмір припустимого неметалевого включення і волосовин не повинен перевищувати 0,3 мм по ширині та 4 мм по довжині. По кожній шатунній, корінній шийках і щоках допускається не більше двох подібних дефектів. На радіусах і на відстані 5 мм від них дефекти і їхнє виправлення не допускаються. З інших вимог слід зазначити, що виходи отворів для змащення повинні мати чистоту обробки не гірше 0.63 на глибину 10 мм.

У даній роботі вивчення мікроструктури проводили за допомогою металографічного мікроскопа МІМ-8. Для визначення мікротвердості використали прилад типу ПМТ-3 з навантаженням 50 г. Схема вирізки зразків для виготовлення мікрошліфів наведена на рисунку 4.1.

При візуальному огляді колінчатого вала виявлено, що шорсткість поверхонь шатунних шийок і виходів отворів для подачі

змащення не задовольняє вимозі креслення. Від отворів для змащення в напрямку місця руйнування поширюються тріщини довжиною близько 20мм. Такі ж дефекти виявлені на двох сусідніх шийках (рис.4.2).



1 – заготовка (диск товщиною $\delta=10$ мм,) 2 – лінії розрізання заготовки,
3 – поверхня шліфа, 4 – місця вимірювання мікротвердості

Рисунок 4.1 – Схема вирізання зразків

Обговорення результатів

Відомо, що в умовах циклічного навантаження (характерних для колінчатих валів) руйнування відбувається тоді, коли під дією прикладених напружень в металі виникають та розвиваються тріщини.

Число циклів, необхідне для втомного зародження тріщини, сильно залежить від стану поверхні, зокрема її шорсткості. Так Уодсворт [1] встановив, що в результаті зняття зі зразків шарів матеріалу товщиною 30 мкм їх довговічність можна збільшувати нескінченно. Це свідчить про те, що підвищена шорсткість поверхні зменшує довговічність деталей. Очевидно, що негативний вплив підвищеної шорсткості поверхні у першу чергу проявляється в важконапружених ділянках, якими на колінчатому валі є місця шатунних шийок ослаблені отворами для подачі змащення. З огляду на вищесказане, однією із причин передчасної появи тріщин, показаних на рисунку 4.2, варто вважати підвищену шорсткість поверхонь на виході із отворів. Причому, якщо поверхня шийок могла бути ушкоджена під час аварії, то низька чистота поверхні виходів із отворів, скоріше за все є браком, що виник при виготовленні виробу.

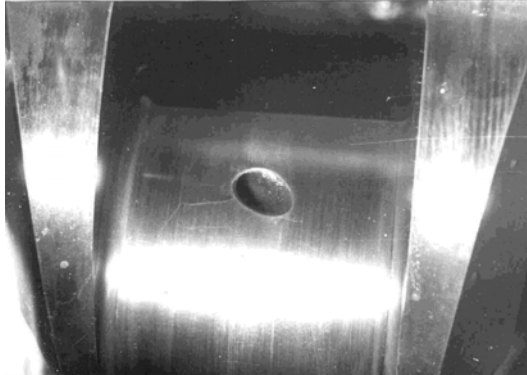


Рисунок 4.2 – Тріщини, що поширюються від отвору на шийці

Відомо, що характер зламу залежить від структури металу і дозволяє передбачити причини руйнування деталей. Тому наступним кроком даної роботи було вивчення будови зламу. Злам даної деталі представлений на рисунку 4.3.

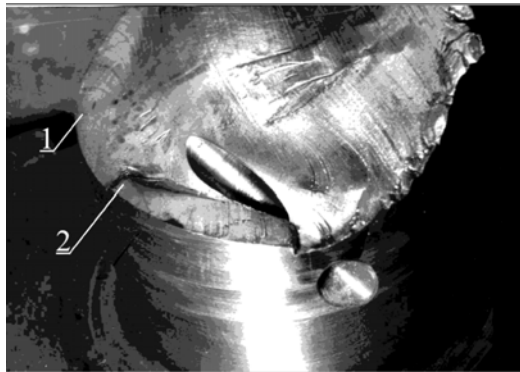


Рисунок 4.3 - Злам колінчатого вала, що відпрацював половину планового ресурсу

Із цього рисунку видно, що зародження руйнування має багатоджерельний характер. Одна із втомних тріщин, імовірно, зародилася в зоні переходу від щоки до шийки колінчатого вала (позиція 1 на рис. 4.3). Друге місце зародження втомного руйнування (позиція 2 того ж рисунка) розташоване на поверхні шийки вала. Таке

багатоджерельне зародження втомного руйнування, як правило, вказує на існування декількох причин, що викликали руйнування деталі.

Зародження втомної тріщини в зоні переходу від шоки до шийки, ймовірно, обумовлено концентрацією напружень, що звичайно виникає в подібних місцях. Концентрація напружень у таких зонах може значно підвищуватись при наявності рисок і металургійних дефектів. Друге місце зародження втомного руйнування може бути обумовлено здатністю тріщин у ряді випадків зароджуватися безпосередньо по границях зерен і двійників, а також субзерен. Джерелом зародження тріщини може стати і міжфазна поверхня неметалевого включення – матриця [3]. Причому якщо згідно [2] тріщини зароджуються по границях таких мікроскопічних дефектів, як блоки і субзерна, то ймовірно можна припустити, що мінімальний розмір неметалічних включень, при їх формі, що сприяє зародженню втомних тріщин може бути таких же невеликих розмірів, як і зазначені структурні елементи. Тому допускати наявність неметалічних включень довжиною до 4 мм., як зазначено у вимогах креслення, нам здається некоректним.

У зв'язку з вище викладеним наступним етапом даної роботи було дослідження мікроструктури матеріалу вала, що безпосередньо примикає до місця руйнування.

Поверхня нетравленого шліфа представлена на рисунку 4.4. Як видно (рис. 4.4) у зразку металу присутні неметалічні включення, на наш погляд, здатні сприяти виникненню втомних тріщин (наприклад при їхньому розташуванні в області галтелі). Причому якщо біля окремих включень зароджуються тріщини, які поширюються порівняно повільно, то у випадку скупчення неметалічних включень, показаному на рисунку 4.4, можливий більш швидкий розвиток магістральної тріщини, обумовлений об'єднанням тріщин, що утворюються біля кожного окремого включення. Таким чином, наявність скупчень неметалічних включень, що виявлені в матеріалі, також могли бути однією із причин, які знизили ресурс роботи колінчатого вала.

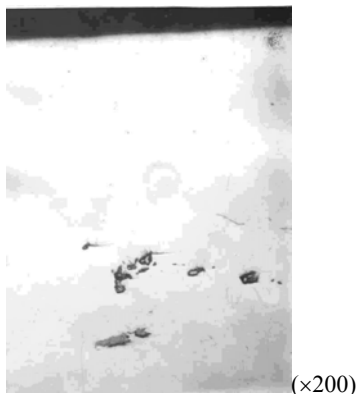
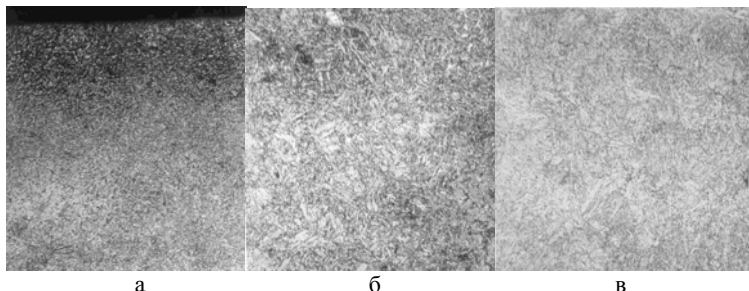


Рисунок 4.4 – Скупчення неметалічних включень

На підвищення втомної міцності позитивно впливає наявність напружень стиснення у поверхневому шарі матеріалу. На поверхні досліджуваного колінчатого валу такого роду напруження повинні були б бути викликані азотуванням. При відносно невисоких температурах порядку 550°C вдається одержати дрібні нітриди і концентрацію азоту достатню для істотного збільшення параметра кристалічної ґратки α -фази. У результаті цього підвищується твердість і об'єм поверхневого шару. Збільшення об'єму тільки тонкого поверхневого шару викликає в ньому появу напружень стиснення.

В даному випадку (рис. 4.5) у поверхневому шарі деталі спостерігаються відносно крупні нітриди. Крім того безпосередньо під азотованим шаром знаходиться зона із структурою, схожою на структуру серцевини деталі. На наш погляд доречно припустити, що така структура могла утворитися при нагріванні поверхневого шару деталі до більше високої температури ніж 550°C . Для підтвердження цієї гіпотези вивчили зміну мікротвердості по перетину шатунної шийки колінчатого вала в напрямку від поверхні до її центра. Як видно з таблиці 4.1 мікротвердість азотованого шару значно нижче звичайно одержуваних значень і приблизно така ж, як мікротвердість серцевини шийки, а підповерхневий шар (від 0.85 до 5 мм.) має мікротвердість ще нижче.



а - поверхневий шар глибиною до 0.5 мм
 б - підповерхневий шар глибиною від 0.5 мм. до 5 мм
 в - серцевина глибиною більше 15мм

Відстань від зламу до зразка-шліфа близько 10 мм
 Рисунок 4.5 – Зміна мікроструктури по перетину шийки вала

Таблиця 4.1 – Зміна мікротвердості по перетину шийки від поверхні в глибину деталі.

Відстань від поверхні, мм.	0.15	0.25	0.35	0.5	0.85	1.0	1.5	2.0
Значення Н	582	604	557	564	391	386	374	447
Відстань від поверхні, мм.	3.0	4.0	5.0	7.0	9.0	10.0	15.0	3.0
Значення Н	447	420	473	483	532	560	592	447

Примітка: довірчий інтервал у визначенні мікротвердості при $\alpha = 0.05$ становить $H \pm 30$

Зниження мікротвердості поверхневого і підповерхневого шарів підтверджує гіпотезу про те, що дана деталь піддавалася поверхневому перегріванню, тому що при нагріванні азотованого шару до температур, що значно перевищують температури азотування, (орієнтовно вище 700 °С), звичайно відбувається укрупнення нітридів і як результат – зниження мікротвердості. Якщо вважати наведені міркування справедливими, то ще одну причину зниження втомної міцності колінчатого вала можна уявити у такий спосіб: при нагріванні поверхні шийок верхній шар металу розширюється і оскільки серцевина деталі холодна відбувається пластична деформація поверхневих ділянок матеріалу. При охолодженні металу поверхневого шару він зменшується в об'ємі і в результаті між ним і серцевиною шийки виникають внутрішні

напруження першого роду. Причому на поверхні виникають розтягувальні напруження. Вони також можуть бути додатково збільшені внаслідок виділення із кристалічної ґратки металу поверхневого шару атомів азоту. Виникнення розтягувальних напружень, внаслідок нагрівання поверхні шийок, могло бути ще однією причиною зниження терміну служби колінчатого вала.

Висновки:

Руйнування валу ініціювали наступні причини: ...

- а) ...
- б) ...
- в) ...

Завдання на підготовку до лабораторної роботи

Для виконання лабораторної роботи та пояснення результатів експериментів необхідно пропрацювати такі питання:

1. Руйнування матеріалів.
2. Структура та механічні властивості об'ємно-загартованих сталей.
3. Механічні властивості при змінних (циклічних) навантаженнях.
4. Перетворення мартенситу і залишкового аустеніту при нагріві (відпуск сталі).
5. Азотування сталі.
6. Конструкційні (машинобудівні) поліпшуванні леговані сталі.
7. Основи раціонального вибору сталей для деталей машин.
8. Контроль якості азотованого шару.

Контрольні питання

1. Обґрунтувати актуальність (необхідність) проведення даної роботи.
2. Дослідження умов експлуатації валу (характер навантаження, вплив середовища, оцінка можливості перенавантаження).
3. Охарактеризувати результати вивчення технічної документації на дану деталь.

4. Встановити правильність вибору марки сталі та термічної обробки.

5. Обґрунтувати обмеження щодо наявності дефектів (флокенів, неметалевих включень, шорсткості поверхні).

6. Вказати мету візуального огляду деталі.

7. Обґрунтувати корисність дослідження зламу, та сформулювати гіпотезу щодо причин руйнування за їх результатами.

8. Вказати можливі чинники, що сприяють зародженню тріщин на поверхні шийок, в місці переходу від щоки до шийки та в тілі шийки.

9. Вибрати методики досліджень (визначення хімічного складу, дослідження нетравлених та травлених шліфів, стану поверхні, вимірювання твердості щодо підтвердження висунотої гіпотези або її удосконалення).

10. Сформулювати висновки за отриманими результатами та рекомендації щодо зниження або усунення впливу негативних факторів.

Матеріали й устаткування

Фотографії зламів валу тепловоза, зразки для мікроструктурних досліджень, прилад ПМТ-3, мікроскоп.

Вказівки з техніки безпеки

Роботу виконують з дозволу викладача у відповідності з інструкціями із ТБ (додаток А).

Порядок виконання лабораторної роботи

Виконати роботу у відповідності з даним прикладом.

Порядок оформлення звіту

Оформити звіт у відповідності з даним прикладом. Сформулювати висновки та рекомендації щодо усунення виявлених причин руйнування дослідженої деталі (зміна вимог на кресленні, заміна матеріалу та термообробки, застосування інших методів контролю якості матеріалу і ін.).

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5
Приклад виконання роботи на тему
«Дослідження причин зниженої стійкості ливарних мульд»

Мета роботи: встановити причини зниженої стійкості мульд для розливу феросплавів.

Приклад оформлення роботи
Вступ

В теперішній час із встановленням ринкових відносин споживач має можливість використовувати мульки різних підприємств, у тому числі підприємств, що внаслідок різних причин перейшли на випуск нової для них продукції та пристосували своє устаткування для виробництва різних виробів. Це може приводити до того, що чавун у виливках різних підприємств буде відрізнятися структурою, яка багато в чому визначає його властивості, а відповідно і ресурс роботи виробів [1]. Так згідно даним зазначеної роботи термічна стійкість сірого чавуну (стійкість проти утворення термічних тріщин) багато в чому визначається формою та розмірами графітових включень. У свою чергу зазначені параметри графіту залежать не тільки від хімічного складу чавуну, а і від технологічних факторів (температури перегріву та часу витримки розплаву в рідкому стані), які в свою чергу, залежать від умов кожного конкретного підприємства.

На підприємстві з литва кольорових металів було налагоджено виробництво мульд для охолодження феросплавів у виді чушок на ЗФЗ. Проте ресурс роботи таких виробів був значно нижчий ніж таких же виробів, що постачаються з Алчевського підприємства. Тому за ініціативи ЗФЗ з метою виявлення причин низької стійкості мульд, що постачаються у відповідності з ТУ 14-12-327-85 Запорізьким підприємством була проведена дана робота.

Матеріал і методика

Згідно ТУ 14-12-327-85 чавун мульд повинен мати: границю міцності >2350 МПа, твердість 140 ... 220 НВ, хімічний склад який наведено у таблиці 5.1. Креслення мульки наведено на рисунку 5.1, а розміри та масу в таблиці 5.2.

Таблиця 5.1 – Хімічний склад чавунів мутьд

Завод виробник	Хімічний склад, % мас.							
	C	Si	Mn	Ti	Cu	Cr	S	P
Склад чавуну за ТУ 14-12-327-85	3,2...	1,4...	0,4...	0,07...	0,45...	< 0,2	<0,1	<0,2
	3,5	2,2	0,8	0,2	0,8			
Рядова мутьда	3,45	2,42	0,57	0,02	0,25	0,1	0,04	0,06
Запорізька мутьда	3,2	3,25	0,22	0,03	0,02	0,02	0,32	0,06
Алчевська мутьда	3,82	1,56	0,39	0,02	0,04	0,05	0,13	0,05

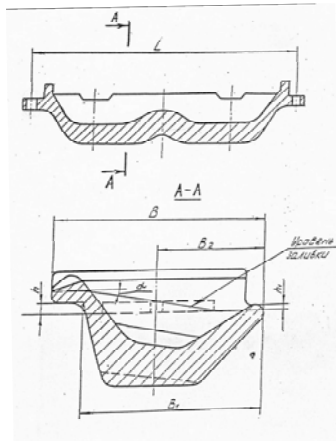


Рисунок 5.1 – Креслення мутьди

Таблиця 5.2 – Основні розміри та маса мутьд

L, мм	B, мм	B ₁ , мм	B ₂ , мм	h, мм	h ₁ , мм	α град.	Маса, кг
970	430	370	215	27	13	9	208

Для проведення досліджень зразки вирізалися із двох ділянок мутьд (вушка і ребра), що не контактували із заливаемим феросплавом і, ймовірно, зберегли структуру, що утворилася при виготовленні даних мутьд. Вивчення мікроструктури проводили на нетравлених і травлених (в розчині азотної кислоти) шліфах. Хімічний склад та твердість зразків визначали користуючись стандартними методиками. Мікротвердість структурних складових визначали за допомогою приладу ПМТ-3 при навантаженні 50 г.

Оскільки в металознавстві одне з базових положень має вид – хімічний склад – структура – властивості, то в першу чергу проаналізували можливий вплив хімічного складу чавуну мульд Запорізького заводу і Алчевського підприємства на його структуру. Для порівняння також аналізували хімічний склад зразків, вирізаних з мульд, що відпрацювали достатній (на думку фахівців ЗФЗ) ресурс, надалі називаємих рядовими.

Обговорення результатів

Як видно з наведеної таблиці вимогам до хімічного складу, вказаним у технічних умовах (ТУ 14-12-327-85), не відповідає жоден із представлених чавунів.

Так у чавуні Алчевського підприємства концентрація вуглецю (3,82 % мас.), виявилась вище за верхню границю вказану в ТУ (3,5 %). Навіть якщо це зроблено для поліпшення технологічних ливарних властивостей, а саме наближення складу до евтектичного, навряд чи можна вважати це рішення раціональним. Оскільки підвищення вмісту вуглецю в чавуні сприяє зниженню дисперсності перлітної основи та збільшенню як розміру, так і кількості графітних включень, що негативно впливає на механічні властивості. Тим не менш слід зазначити, що для однозначного висновку щодо якості мульд цих даних недостатньо.

Так відомо, що зі структурних складових чавуну (феррита, перліту, цементиту і графіту) саме графіт має найвищу теплопровідність, зокрема у напрямку, перпендикулярному базисним кристалографічним площинам, його теплопровідність приблизно в 4.8 разів вище теплопровідності ферита. Отже, збільшення кількості графіту в структурі чавуну може сприяти підвищенню його теплопровідності, що може приводити до пришвидшення вирівнювання температури по перерізу мульди при заповненні її феросплавом та при охолодженні її у воді, що в свою чергу повинно позитивно впливати на стійкість мульд. У зв'язку із цим, очевидно, має сенс оцінити вплив підвищення теплопровідності чавуну на якість мульд.

Наступна невідповідність щодо хімічного складу – у чавуні мульд Запорізького заводу концентрація сірки досягає 0,32 % мас., що вище верхньої границі, зазначеної в ТУ (0,12 % мас.). Як відомо сірка сприяє збільшенню зв'язаного вуглецю тобто виділенню цементиту

замість бажаного в даному випадку графіту, оскільки включення цементиту тверді і приводять до значно вищої концентрації напружень, ніж графітові включення. Крім того сірка знижує рідинно-плинність, сприяє утворенню газових пухирів, збільшує усадку і схильність до утворення тріщин

Чавун мульди "рядової" не відповідає вимогам ТУ за вмістом кремнію (2,42 % мас. при встановленому верхньому значенні в ТУ - 2,2 % мас.). Підвищений вміст кремнію (2,42 % мас. замість 2,2 % мас.) сприяє виділенню вуглецю у формі графіту і запобігає утворенню цементиту, що в даному випадку може бути позитивом щодо якості мульд. Проте сприяння кремнію утворенню графіту може приводити до укрупнення складових перлітної основи та збільшенню, як розміру, так і кількості графітних включень, і як наслідок, негативно впливати на механічні властивості чавуну.

Слід також зазначити досить низький вміст міді (нижче норми встановленої в ТУ) у всіх досліджених чавунах. Мідь є графітзатором при кристалізації і стабілізує перлітний цементит при евтектоїдному перетворенні, що досить вигідно при необхідності одержати чавун з перлітною структурою і без відбілу (тобто частинок цементиту, що не входять до складу перліту). Крім того, з одного боку мідь, що виділяється на міжфазних границях, може підвищувати теплопровідність чавуну, що в свою чергу може сприяти зменшенню температурного інтервалу, а відповідно і значень температурних напружень, які виникають під час заливання в мульду феросплаву і охолоджені її у воді. З іншого боку підвищення концентрації міді в чавуні збільшує його температурний коефіцієнт розширення, що навпаки може приводити до підвищення температурних напружень при експлуатації мульд. Для однозначного рішення цього питання доцільно провести теоретичну оцінку та експериментальну перевірку висунутих гіпотез.

З метою підтвердження або спростування описаних гіпотез перш за все було проведене дослідження мікроструктури зразків чавуну, вирізаних з досліджуємих мульд.

Результати дослідження нетравлених шліфів представлені на рисунках 5.2 і 5.3.

Із рисунка 5.2 видно, що графіт у чавуні мульди Запорізького заводу представлений дрібними включеннями, а в чавуні мульди

Алчевського підприємства спостерігаються крупніші включення графіту (рис.5.3).



Рисунок 5.2. – Нетравлений шліф чавуну мульди Запорізького заводу

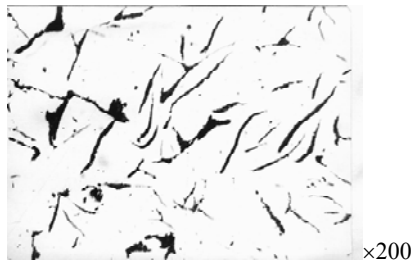


Рисунок 5.3. – Нетравлений шліф чавуну мульди Алчевського підприємства

Дані результати підтверджують гіпотези, висунуті при аналізі хімічного складу чавунів щодо описаного впливу сірки та підвищеного вмісту вуглецю. Дійсно в чавуні мульди Запорізького заводу підвищений вміст сірки і відповідно дрібніші порівняно з чавуном мульд Алчевського підприємства включення графіту.

Аналіз травленого шліфа чавуну мульди рядової показав, що його структура складається з перліту і невеликих ділянок ферита часто розташованих навколо включень графіту (рис. 5.4).



x200

Рисунок 5.4 – Травлений шліф (мікроструктура) чавуну мутьди рядової

Згідно даним роботи ділянки м'якого фериту, які часто оточують включення графіту, знижують концентрацію напружень, що викликані пластинками графіту, які за формою схожі на тріщини. Це підвищує опір чавуну поширенню тріщин. Таким чином можна стверджувати, що найвища стійкість мутьд називаних рядовими (із розглядаємих мутьд), обумовлена їх сприятливою структурою.

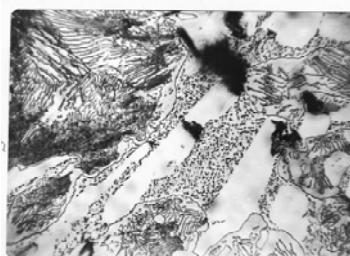
В чавуні мутьди Алчевського підприємства присутня значно більша частка феритної складової рис.5.5.



x200

Рисунок 5.5 – Травлений шліф (мікроструктура) чавуну мутьди Алчевського підприємства

Мікроструктура зразків чавуну, вирізаних з ребра мутьди Запорізького заводу (крім графіту), складається з перліту і має у своєму складі ще і світлі включення, які можуть бути як феритом, так і цементитом (рис. 5.6).



x300

Рисунок 5.6 – Травлений шліф (мікроструктура) чавуну мульди Запорізького заводу

Оскільки розрізнити ферит і цементит у мікроструктурі досить складно було проведено визначення мікротвердості цих фаз, а також твердості розглядаємих зразків. Результати вказаних досліджень наведено в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Твердість і мікротвердість досліджених зразків чавуну

Завод виробник	Місце вирізки зразка	Твердість			
		НВ	HRB	Мікротвердість H	
				Ферит	Цементит
Рядова мульда	Вушко	187	85	414	-
	Ребро	183	82	-	-
Запорізька мульда	Вушко	229	96	663	1529
	Ребро	217	93,5	-	-
Алчевська мульда	Вушко	125	41	289	-
	Ребро	121	45	-	-

Присутність у структурі чавуну мульди Запорізького заводу саме цементиту підтверджує висока мікротвердість (1529) світлих ділянок у її структурі, які, ймовірно, і приводить до підвищення концентрації напружень і як результат – зниженню опору поширенню тріщин чавуну цих мульд. Цей факт є підтвердженням висунутої гіпотези щодо впливу сірки, яка сприяє виділенню вуглецю у виді цементиту та відсутності міді у хімічному складі даного чавуну, що теж обумовлює виділення вуглецю у виді цементиту.

Крім того як видно з наведеної таблиці 3, найбільш високу твердість має чавун мульты Запорізького заводу, трохи нижчу – чавун мульты з назвою "рядова" і найнижча твердість (нижче необхідної за ТУ) у чавуна мульты Алчевського підприємства. Зниження твердості чавуну мульты Алчевського підприємства обумовлено підвищенням вмісту в його структурі фериту (рис. 5.7). Велика кількість феритної складової у чавуні мульты Алчевського підприємства, зокрема може бути обумовлена повільним охолодженням виливків при прийнятій на даному підприємстві технології.

На рисунку 5.7 представлена мікроструктура в районі поширення тріщини по структурним складовим чавуну Алчевського підприємства.



Рисунок 5.7 – Поширення термічної тріщини по структурним складовим чавуну Алчевського підприємства

Як видно з даного рисунка, тріщина поширюється з поверхні вглиб дна по найбільш великим включенням графіту та фериту. Даний експериментальний факт ще раз підтверджує відоме положення про те, що наявність фериту в сірому чавуні не сприяє підвищенню опору поширенню тріщин незважаючи на те, що він найбільш пластичний із структурних складових.

Відповідно до наведених результатів структура чавуну мульты Запорізького заводу не є оптимальною, оскільки містить включення цементиту, які, імовірно, утворюються внаслідок занадто швидкого охолодження виливків, присутності підвищеного вмісту сірки та відсутності міді. Оскільки швидкість охолодження виливків змінити технологічно складно, можна спробувати усунути цементитні включення в чавуні мульты Запорізького заводу або зменшити кількість феритної складової у структурі чавуну мульты Алчевського

підприємства підбором певного співвідношення між феритоутворювальними і перлітоутворювальними легувальними елементами. Конкретні рекомендації для оптимізації виробництва мульд можна сформулювати на підставі систематичних досліджень впливу на структуру чавуна технологічних параметрів і складу шихти в умовах конкретного підприємства.

Результати проведених досліджень підтверджують відоме положення про те, що найбільш сприятливою, з погляду одержання високого опору поширення тріщин сірого чавуну є структура, що складається з перліту та включень графіту, оточених невеликою кількістю феритного прошарку.

Таким чином, можна вважати встановленим, що структура чавуну для виготовлення мульд повинна складатися з перліту та графіту (по можливості дисперсних) при мінімальній кількості фериту, що оточує графітні включення.

Висновки:

а) ...

б) ...

в) ...

Рекомендації:

а) ...

б) ...

в) ...

Завдання на підготовку до лабораторної роботи

Для виконання лабораторної роботи та пояснення результатів експериментів необхідно пропрацювати такі питання.

1. Сірий і білий чавуни.
2. Основи раціонального вибору чавуну.
3. Вплив легувальних елементів та домішок на структуру та властивості чавуну.
4. Термічна обробка чавуну.

Питання до лабораторної роботи

Обґрунтувати актуальність (необхідність) проведення даної роботи.

Дослідження умов експлуатації мульд (характер навантаження, вплив середовища, температурний режим).

Охарактеризувати результати вивчення технічної документації на дану деталь.

Встановити правильність вибору матеріалу та термічної обробки.

Обґрунтувати обмеження щодо наявності дефектів.

Вказати мету візуального огляду деталі.

Обґрунтувати необхідність визначення хімічного складу. Описати вплив вмісту вуглецю на технологічні властивості чавуну та ресурс роботи виробів.

Охарактеризувати вплив сірки, кремнію та міді на структуру та властивості чавуну.

Вказати корисність дослідження не травлених та травлених шліфів, вимірювання твердості для формулювання гіпотези щодо причин руйнування мульд.

Вибрати методику досліджень щодо підтвердження висунутої гіпотези або її удосконалення.

Сформулювати висновки за отриманими результатами та рекомендації щодо зниження або усунення впливу негативних факторів на стійкість мульд. Запропонувати термічну обробку для виправлення структури чавуну мульд Запорізького підприємства. Описати особливості поширення тріщин по структурним складовим чавуну та сформулювати вимоги до його структури.

Матеріали й устаткування

Зразки для мікроструктурних досліджень, прилад ПМТ-3, мікроскоп, твердомір ТШ-2М.

Вказівки з техніки безпеки

Роботу виконують з дозволу викладача у відповідності з інструкціями із ТБ (додаток А).

Порядок виконання лабораторної роботи

Виконати роботу у відповідності з даним прикладом.

Порядок оформлення звіту

Оформити звіт у відповідності з даним прикладом. Сформулювати висновки та рекомендації щодо усунення виявлених причин руйнування дослідженої деталі (зміна вимог на кресленні, заміна матеріалу та термообробки, застосування інших методів контролю якості матеріалу і ін.).

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6

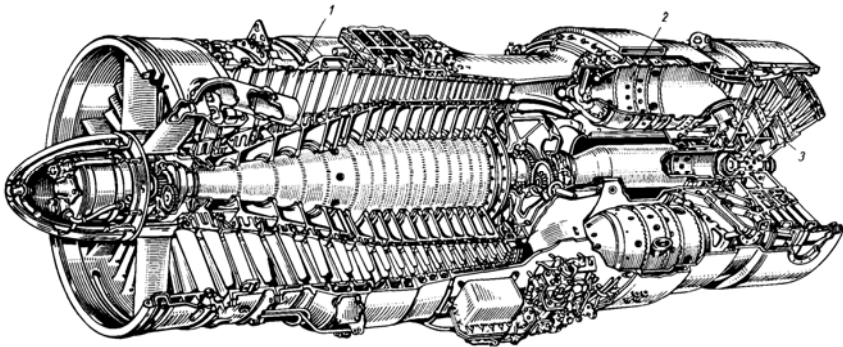
Проведення експертизи причин руйнування робочої лопатки I ступені компресора ГТД

Загальні відомості

Газотурбінний двигун (ГТД) – це двигун, в якому енергія згоряння палива перетворюється або в механічну роботу на валу турбіни або в кінетичну енергію реактивного струменя газів.

За призначенням ГТД поділяють на стаціонарні, транспортні, авіаційні, суднові.

До складу сучасного ГТД (рис.6.1) входять наступні основні вузли: компресор, камера згоряння, турбіна (по ходу повітря).



1 – компресор; 2 – камера згоряння; 3 - турбіна

Рисунок 6.1 – Турбореактивний двигун

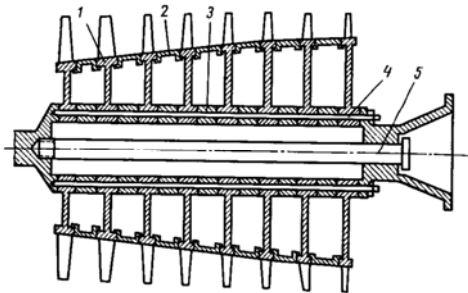
Пошкодження, що зустрічаються при експлуатації ГТД, можуть бути конструктивного, технологічного та експлуатаційного походження.

Конструктивні дефекти виникають із-за невдалого вибору конструкції або матеріалу, а також внаслідок помилок при проектуванні ГТД та його окремих вузлів. Технологічні дефекти виникають при відхиленнях від технології виготовлення та складання вузлів ГТД (це відхилення розмірів, непередбачена заміна матеріалу, порушення режимів термічної обробки, невідповідна якість поверхневої обробки деталей, порушення центрування при складанні і ін.). Експлуатаційні дефекти виникають у випадку експлуатації із перевищенням ресурсу, при перевищенні встановлених робочих параметрів, при недотриманні строків заміни вузлів та деталей, які

відпрацювали свій ресурс, використання некондиційного палива та мастила, робота на забрудненому повітрі і ін.

Компресор ГТД

В компресорі ГТД (рис.6.2) відбувається стискання повітря перед його надходженням у камеру згорання. Основні елементи компресора: ротор з робочими лопатками і статор – корпус компресора з напрямними лопатками. Найбільша кількість відмов компресора пов'язана з пошкодженням лопаток як робочих, так і напрямних.



1 – диск; 2 – зовнішні кільця; 3 – внутрішнє розпірне кільце;
4 – периферійний болт; 5 – центральний болт

Рисунок 6.2 – Дисковий набірний ротор осевого компресора

Ротор компресора (робочі лопатки, диски, барабан, вал) – основний робочий елемент компресора. Завдяки обертанню ротора робочі лопатки передають повітря механічну енергію, внаслідок чого тиск повітря і запас енергії зростають.

Робоча лопатка має профільну частину (перо) і замкову частину (хвостовик), (рис.6.3), за допомогою якої закріплюється або на барабані, або на диску. Профільну частину обтікає потік повітря.

Типові пошкодження лопаток компресора ГТД: забоїни від сторонніх предметів (рис.6.4), що потрапляють в проточну частину, а також корозійні пошкодження, які можуть істотно знижувати віброміцність лопаток.

Початок втомного руйнування металу робочої лопатки компресора носить місцевий характер. В зоні підвищених напружень, обумовлених конструктивними, технологічними, структурними або експлуатаційними факторами, може утворитися мікротріщина. При

багатократній зміні напружень відбувається руйнування кристалів в зоні тріщини і тріщина проникає вглибину тіла лопатки. Поверхні, які стикаються в зоні тріщини, знаходяться в умовах контактної взаємодії, внаслідок чого стираються та набувають вигляд дрібнозернистої структури. Так утворюється одна із зон майбутнього зламу. В результаті розвитку тріщини переріз лопатки слабшає, а потім відбувається несподіване руйнування матеріалу. Злам має характерну поверхню з нешкодженими кристалами (рис. 6.5, 6.6).

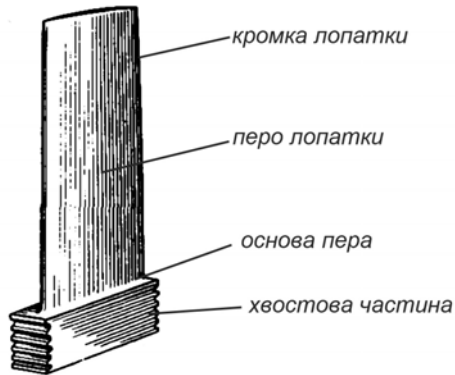


Рисунок 6.3 – Робоча лопатка компресора

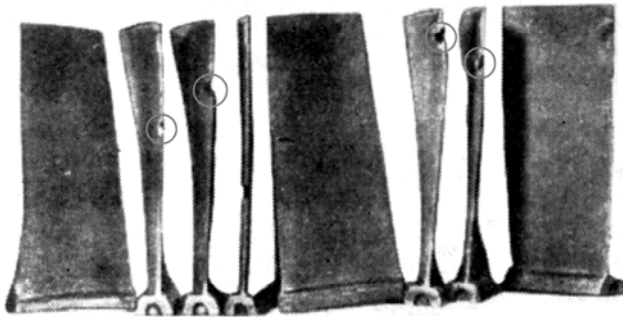


Рисунок 6.4 – Забоїни на робочих лопатках компресора, які виникли внаслідок потрапляння стороннього предмета в проточну частину

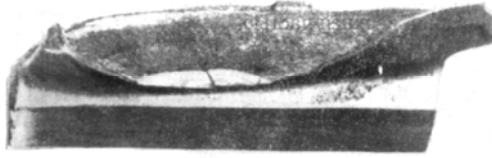


Рисунок 6.5 – Вид втомного зламу робочої лопатки компресора



Рисунок 6.6 – Вид втомного зламу робочої лопатки компресора

Злам від втоми має 3 зони: зона утворення тріщини; зона втомного руйнування – дрібнозерниста структура та темний колір; зона миттєвого руйнування – кристали мають гостру огранку та блискучу поверхню.

Розвиток руйнування від втоми починається, як правило з вхідних кромek робочої лопатки, рідше – з вихідних. Іноді зародження тріщини відбувається зі спинки або корита в кореневій частині лопатки.

Дуже часто центрами утворення тріщини є ділянки, які пошкоджені корозією. В цих місцях починається руйнування лопатки із-за корозійної втоми (рис.6.7, 6.8, 6.9).



Рисунок 6.7 – Корозійне пошкодження поверхні робочої лопатки компресора

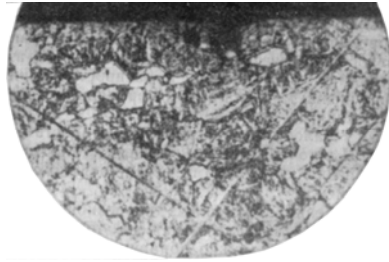


Рисунок 6.8 – Мікрошліф, який ілюструє розвиток корозійного пошкодження поверхні робочої лопатки компресора

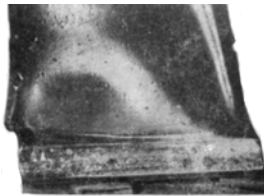


Рисунок 6.9 – Утворення тріщини в кореневій частині робочої лопатки компресора

Руйнування матеріалу від корозійної втоми відбувається в 2 етапи. На першому етапі сумісна дія корозійного середовища та знакозмінних напружень призводить до утворення та розвитку тріщини. На другому етапі на розповсюдження та руйнування переважно впливають змінні механічні навантаження.

Як руйнування від втоми, так і руйнування від корозійної втоми не пов'язані з межами зерен, однак характер ламів різний. При руйнуванні від корозійної втоми поверхня металу уражена точковою корозією. На дні раковин можна виявити тріщини, які направлені перпендикулярно до дії навантаження. Ці тріщини завжди присутні і в залежності від їх величини їх можна побачити при невеликому збільшенні або травленням і магнітними контролем.

Звичайний втомний злам, як правило має одну тріщину.

На рис.6.10 зображено злам робочої лопатки компресора при миттєвому руйнуванні.



Рисунок 6.10 – Злам робочої лопатки компресора при миттєвому руйнуванні

Вимоги до матеріалу лопаток компресора: висока втомна міцність; корозійна та ерозійна стійкість; високі властивості міцності при робочих температурах. Крім того матеріал лопаток першої ступені повинен мати низький поріг холодноламкості.

При виборі матеріалів для виготовлення робочої лопатки компресора визначальною характеристикою є опір втомі.

Матеріали для робочих лопаток:

- до 250°C алюмінієві сплави (АК4-1, ВД-17); проте лопатки першої ступені слід виконувати з корозійностійкої сталі. При цих температурах можна використовувати також склопластики;
- до 500°C – титанові сплави (ВТ3-1, ВТ8, ВТ10);
- вище 550°C – хромисті сталі (13Х11Н2В2МФ, 13Х14Н3В2ФР, 14Х17Н2).

Приклад проведення експертизи причин руйнування робочої лопатки першої ступені компресора суднового ГТД

Робоча лопатка експлуатується в умовах морського середовища, виготовлена з корозійностійкої сталі 20Х13. Термічна обробка лопатки: гартування та високотемпературне відпускання. Структура після термічної обробки: сорбіт відпуску.

По перу лопатки утворилася тріщина. Можливі причини виникнення тріщини: руйнування від корозійної втоми або від потрапляння сторонніх частинок в проточну частину компресора..

Досліджується поверхня пера лопатки – корозійні пошкодження не виявлені. Потім досліджується мікроструктура пера лопатки в місці руйнування. Структура сорбіт повинна спостерігатися за всім перерізом лопатки, не повинно бути карбідів хрому $Cr_{23}C_6$. Наявність цього карбіду по межах зерен призводить до розвитку міжкристалітної корозії (виділення цього карбіду збіднює твердий розчин (Ф) на хром та знижує корозійну стійкість сталі). В цьому випадку на сталь

одночасно діє корозійне середовище та механічні навантаження і, як наслідок цього процесу, утворення в металі корозійних тріщин.

Дослідження мікроструктури показало, що структура сталі відповідає вимогам: структура сорбіт без карбідів $Cr_{23}C_6$ спостерігається за всім перерізом лопатки компресора.

Тоді зробили висновок, що можлива причина руйнування – потрапляння сторонніх частинок разом з повітрям. Провели дослідження поверхні лопаток та на деяких лопатках виявили подряпини (дослідження можна проводити як візуально так і методами неруйнівного контролю).

Під час експлуатації робочої лопатки сторонні тверді частинки наносять удар об робочу поверхню лопатки, відбиваються і потрапляють в основний потік повітря. Крім того, тверді частинки, переміщуючись вздовж поверхні лопатки, дряпають її і зношують робочу поверхню лопатки.

Рекомендації: контроль за станом повітрянозаборного апарата, контроль за чистотою палуб суден.

Завдання на підготовку до лабораторної роботи

1. Ознайомитись з напруженим станом робочої лопатки компресора ГТД.
2. Розглянути причини поломок робочих лопаток компресора.
3. Обґрунтувати вимоги до матеріалу робочої лопатки.
4. Ознайомитись з характеристиками матеріалів, які використовуються для виготовлення робочих лопаток компресора ГТД.

Контрольні питання

1. Описати умови експлуатації робочої лопатки компресора.
2. Вказати можливі причини руйнування робочої лопатки компресора.
3. Обґрунтувати використані методи дослідження для виявлення причин руйнування робочої лопатки компресора.
4. Які рекомендації можна запропонувати для попередження руйнування робочої лопатки компресора?

Матеріали, інструменти, прилади та обладнання

Лопатка з тріщиною. Добрірка шліфів на зразках вирізаних з лопатки в місці утворення тріщини. Металографічний мікроскоп МІМ-7. Струмовихровий дефектоскоп. Фотографії мікроструктур даних сплавів.

Техніка безпеки

Робота виконується відповідно до загальної інструкції з техніки безпеки (додаток А).

Порядок виконання роботи

Провести візуальний контроль виробу. Перевірити відповідність хімічного складу матеріалу виробу заданому кресленням. Здійснити дослідження виробу щодо наявності несучільностей за допомогою струмовихрового дефектоскопу. Дослідити мікроструктуру виробу в місці руйнування. Проаналізувати отримані результати та сформулювати заключення щодо причин виходу з ладу даного виробу.

Зміст звіту

Навести умови експлуатації робочих лопаток компресора; охарактеризувати матеріали для виготовлення робочих лопаток компресора та причини поломок робочих лопаток.

Згідно результатам проведеної експертизи причин руйнування робочої лопатки компресора зробити висновки щодо причин поломки лопатки та надати рекомендації по попередженню встановлених причин поломок.

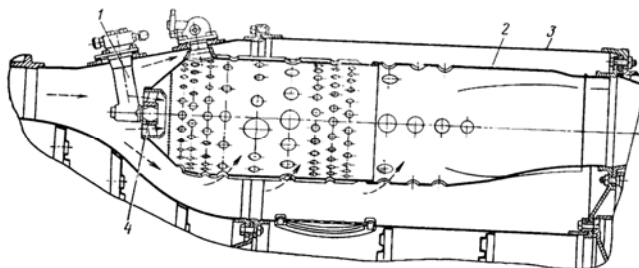
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №7

Проведення експертизи причин руйнування жарової труби авіаційного ГТД

Загальні відомості

Камера згоряння ГТД призначена для спалювання палива в потоці повітря, що подається компресором. Хімічна енергія палива перетворюється на теплову, внаслідок чого температура в камері згоряння зростає від значення T_k (за компресором) до T_g (перед турбіною).

Основні елементи камери згоряння – кожух (корпус) і жарова труба (рис.7.1). Найбільш навантажена – жарова труба і найбільша кількість відмов камери згоряння пов'язана з жарової трубою.



1 – форсунка; 2 – жарова труба; 3 – кожух камери згоряння; 4 - стабілізатор

Рисунок 7.1 – Трубчато-кільцева камера згоряння ГТД турбореактивного двигуна

В жаровій трубі відбувається згоряння палива і забезпечується подача газу заданих параметрів в турбіну ГТД. Температура в жаровій трубі: змінюється від 600-700К на вході до 1400-1800К на виході. Вона нерівномірно розподіляється по товщині, довжині і по колу стінок жарової труби. Така нерівномірність пов'язана з організацією процесу горіння.

В працюючому двигуні на жарову трубу діють наступні навантаження: газодинамічні сили, обумовлені перепадом тиску; температурні напруження.

В результаті нерівномірності температурного поля (рис.7.2) можливо утворення тріщин, короблення, нагароутворення, а іноді прорар стінок.

В камерах згорання стінки жарових труб захищені від нагрівання шаром менш нагрітого газу або повітря. Проте, стінки жарових труб нерівномірно нагріваються навіть при стаціонарних режимах роботи, не говорячи вже про нестационарні, наприклад, при запуску двигуна або при зупинці.

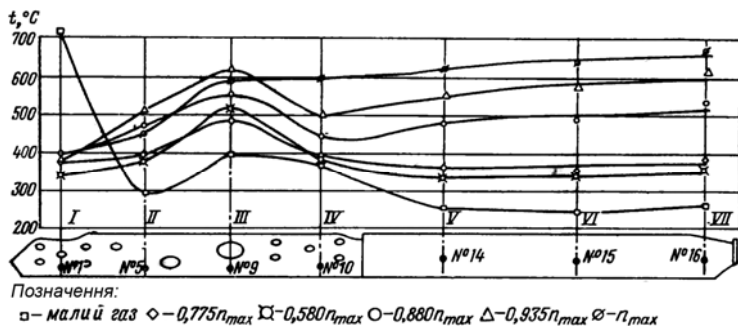


Рисунок 7.2 – Зміна температури стінки жарової труби по її довжині на різних режимах роботи двигуна

До основних видів пошкодження та несправностей камер згорання відносяться: короблення та прогар жарових труб; утворення тріщин в різних деталях камери згорання, деформація температурного поля газового потоку перед турбіною; різні несправності та пошкодження форсунок.

Прогар (рис.7.3) жарових труб є наслідком нерівномірного горіння палива, а також нерівномірного змішування гарячих газів зі вторинним газом в камері згорання. Це призводить до перегрівання та короблення металу в окремих місцях жарових труб, що призводить до порушення їх охолодження і, як слідство цього, прогар. Також причиною прогару може бути нагар. Причиною прогару може бути і виробничий дефект: порушення форми гофрів циліндричних секцій жарових труб, яке призводить до підсмоктування гарячого газу крізь отвори підводу повітря для охолодження.

Утворення тріщин в різних деталях камери згорання відбувається із-за постійної дії термічних напружень, які виникають при періодичному нагріванні та охолодженні в період пусків, зупинок та при змінному режимі роботи ГТД. Тріщини, в основному, утворюються від втоми. Тріщини, як правило, виникають в місцях

підвищеної концентрації напружень в місцях біля отворів для подачі охолоджуючого повітря.

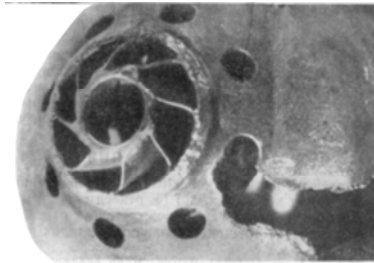


Рисунок 7.3 – Прогар жарової труби

Розвиток тріщини в процесі експлуатації може призвести до відриву частин жарової труби, потраплянню їх в проточну частину турбіни та пошкодженню лопаток турбіни.

Основні вимоги до матеріалу жарової труби: висока жароміцність та жаростійкість; високий опір втомі і тріщиноутворенню при низькій швидкості розповсюдження тріщини; задовільні характеристики теплопровідності і пластичності; задовільні технологічні властивості (оброблюваність різанням, добра зварюваність, здатність до деформації).

Матеріали для виготовлення жарової труби: жароміцні хромонікельові сплави (ХН75МБТЮ, Х20Н80Т, ХН60В, ХН50ВМТЮБ).

Приклад проведення експертизи причин руйнування жарової труби авіаційного ГТД

Жарова труба авіаційного ГТД виготовлена зі сплаву ХН78Т. Термічна обробка – гомогенізація при 980...1020°C. Структура після термічної обробки – γ -твердий розчин на основі нікелю. При огляді жарової труби біля повітряноподаючих отворів були виявлені тріщини. Матеріал використаний для виготовлення жарової труби повинен мати підвищену в'язкість, однорідну структуру з достатньо дрібним зерном. Мікроаналіз показав, що структура сплаву відповідає даним вимогам (γ -твердий розчин). Причиною появи тріщини може бути зниження окалиностійкості при даних температурах, а також наявність концентратора напруження (отвір). Проте, даний сплав має окалиностійкість відповідну експлуатаційним температурам.

Висновок: появу тріщини можна пояснити тим, що кромка отвору, через який подається вторинне повітря, із-за інтенсивного охолодження має температуру значно нижче, ніж ділянки, розташовані між отворами. З цієї причини на менш нагрітих ділянках – на кромках отворів, виникають розтягуючі напруження, які і призводять до утворення тріщин.

Рекомендація: повітря, яке підводиться для охолодження жарової труби повинно мати більш високу температуру.

Завдання на підготовку до лабораторної роботи

1. Ознайомитись з умовами експлуатації жарової труби.
2. Вимоги до матеріалу жарової труби.
3. Матеріали, які використовуються для виготовлення жарової труби газової турбіни.
4. Пропрацювати методики дослідження, що застосовуються для виявлення дефектів жарових труб.

Контрольні питання

1. В яких умовах експлуатуються жарові труби?
2. Пояснити з яких причин може відбуватись руйнування жарової труби.
3. Обґрунтувати вибрані методи досліджень для контролю жарових труб.
4. Які рекомендації можна запропонувати для попередження руйнування жарової труби ?

Матеріали, інструменти, прилади та обладнання

Добірка шліфів на зразках, вирізаних з жарової труби в місці утворення тріщини. Металографічний мікроскоп МІМ-7. Фотографії мікроструктур даних сплавів.

Техніка безпеки

Робота виконується відповідно до загальної інструкції з техніки безпеки (додаток А).

Порядок виконання роботи

Провести експертизу причин руйнування жарової труби авіаційного ГТД.

Зміст звіту

1. Навести умови експлуатації жарової труби газової турбіни; навести вимоги до матеріалів жарових труб газової турбіни та охарактеризувати їх структуру і властивості.

2. Згідно результатів проведених експертиз причин руйнування жарової труби камери згоряння ГТД зробити висновки щодо причин виходу з ладу жарової труби та навести рекомендації щодо їх попередження.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №8

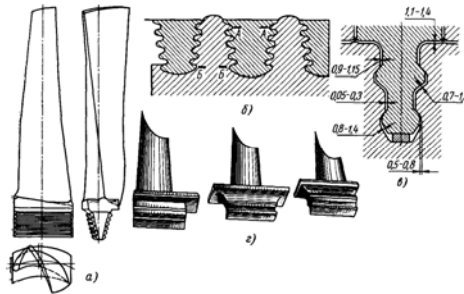
Проведення експертизи причин руйнування робочої лопатки I ступені газової турбіни авіаційного ГТД

Загальні відомості

Турбіна – теплова машина, в якій відбувається перетворення кінетичної енергії газу в механічну енергію обертання валу. Турбіна - самий напружений вузол ГТД, що обмежує в більшості випадків надійність двигуна і його ресурс. Це пов'язано з високими значеннями температури і тиску газу перед турбіною і колової швидкості на середньому діаметрі робочих лопаток.

Турбіна складається з ротора і статора. Ротор турбіни це сукупність деталей, що обертаються (робочі лопатки, диски, вал, підшипники). Диск турбіни із закріпленими на ньому робочими лопатками називається робочим колесом. Основні деталі статора це соплові лопатки та корпус.

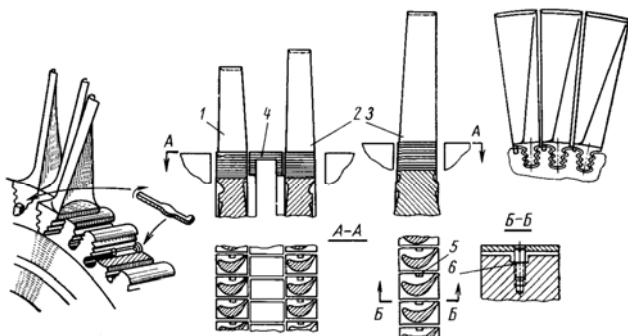
Робочі лопатки (рис.8.1) мають профільну частину – перо і хвостову частину – замок, за допомогою якої лопатки закріплюється на диску.



а – робоча лопатка турбіни низького тиску;
 б – хвостова частина типу «ялинка»; в – хвостова частина лопатки;
 г - робоча лопатка турбіни високого тиску

Рисунок 8.1 – Робочі лопатки турбіни

Вузол кріплення лопаток турбіни наведено на рис. 8.2. Температура робочих лопаток першої ступені досягає 1200-1300К.



- 1,2 – робочі лопатки турбіни високого тиску;
 3 – робоча лопатка турбіни низького тиску; 4 – проставка;
 5 – вкладиш; 6 - гвинт

Рисунок 8.2 – Деталі вузла кріплення лопаток турбіни

В процесі експлуатації перо лопатки знаходиться під дією:

- відцентрових сил, що створюють в них змінні по висоті профілю напруження, максимум яких знаходиться в основі пера;
- під дією газових сил в лопатках виникають напруження від моменту згину, його максимальне значення теж знаходиться в основі пера;
- на лопатки також діють напруження розтягу від відцентрових сил, які розподіляються по поперечному перетину нерівномірно: у центральній частині напруження вищі, у кромки - нижчі.
- температурні напруження. Робочі лопатки мають температуру змінну по висоті та перетину. Градієнт температур по перетину різко зростає під час пусків та зупинок, створюючи помітне поле температурного напруження.

Хвостова частина лопатки (ялинкова або Т-подібна) має значні концентратори напружень: кожен зуб піддається дії напруження зрізу, зминанню і згину.

Окрім статичного напруження в лопатках розвивається вібраційне напруження, під впливом якого відбувається більшість поломок лопаток - внаслідок втомних руйнувань.

Пошкодження робочих лопаток турбіни - найбільш розповсюджений вид руйнування високотемпературних деталей ГТУ.

Причини поломок лопаток.

а) чужорідні частинки (сторонні предмети та уламки пошкоджених деталей), що потрапляють в проточну частину. Це призводить до утворення щербин, вм'ятин і подряпин на поверхні пера лопатки, що діють як надрізи і є концентратами напружень, які суттєво зменшують опір втомі вказаних деталей;

б) підвищений рівень вібраційних напружень сприяє розвитку втомних руйнувань;

в) діючі високі циклічні температурні напруження і перегрів, в умовах яких метал лопаток має недостатню жароміцність. Наприклад: руйнування внаслідок аварійного перевищення температури металу на $\sim 300^{\circ}\text{C}$ вище номінального. Причина: неповне згорання палива в камері згорання і догорання його на робочих лопатках. При таких підвищеннях температури відбувається перегрівання лопаток і знеміцнення матеріалу у зв'язку з розчиненням інтерметалідної фази.

На рис.8.3, 8.4 показано характер обриву робочої лопатки турбіни в результаті зниження втомної міцності матеріалу, яке було визвано короткочасним сильним перегріванням. Мікрошліф зони утворення тріщини наведено на рис.8.5.



Рисунок 8.3 – Характер руйнування робочої лопатки турбіни в результаті зниження втомної міцності матеріалу внаслідок короткочасного перегрівання



Рисунок 8.4 – Вид зламу робочої лопатки турбіни в результаті зниження втомної міцності матеріалу внаслідок короткочасного перегрівання

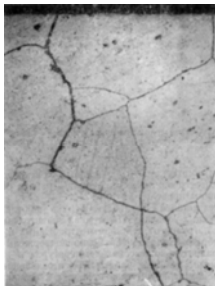


Рисунок 8.5 – Мікрошліф зони утворення тріщини на поверхні робочої лопатки турбіни внаслідок короткочасного перегрівання

г) від термічної втоми. Високі напруження стискання в лопатках (із-за різниці в швидкостях зміни температури в центральній і зовнішній частинах лопатки) за наявності незначних подряпин на вхідних кромках призводять до утворення тріщин;

д) висока концентрація напружень в хвостовій частині лопаток призводить до утворення тріщин в процесі тривалої експлуатації із-за низької тривалої пластичності матеріалу заготовок, його чутливості до надрізу і високої релаксаційної стійкості сталі при робочій температурі;

е) викришування матеріалу з поверхні пера. Причина - нерівномірність старіння при робочих температурах (недостатня стабільність структури);

ж) низька втомна міцність матеріалу лопаток;

з) корозійні пошкодження кромки лопаток.

Механізм втомного руйнування робочих лопаток турбіни схожий з механізмом руйнування робочих лопаток компресора. Але на відміну від лопаток компресора зародження втомних тріщин відбувається в більшості випадків зі сторони спинки або зі сторони корита з вхідної або вихідної кромки. Це пояснюється особливим розподілом напружень. Так, розподіл напружень в основі впадин замка лопатки тісно пов'язаний з розташуванням контура профільної частини лопатки по відношенню до замка. Найбільшу величину напруження набувають в тих місцях, де профіль робочої частини лопатки звисає над поперечним перерізом замка, тобто зі сторони спинки в середині паза, а зі сторони корита – на кромках.

Причиною втомного руйнування робочих лопаток може бути наявність залишкових напружень розтягу в поверхневому шарі, які

виникли при механічній обробці і не були зняті відповідною термообробкою.

Однією з причин втомного руйнування робочої лопатки є певне відхилення в геометрії лопатки та вузла кріплення, яке виникнуло під час виготовлення лопатки.

Крім втомного руйнування, спостерігається руйнування робочих лопаток від наявності металургійних дефектів матеріалу.

Термічні циклічні навантаження призводять до пошкодження лопаток (короблення та розтріскування кромки лопатки). В цьому випадку виникає велика кількість дрібних тріщин та осередків окалини (рис.8.6, 8.7).

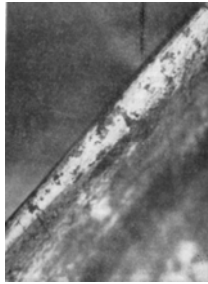


Рисунок 8.6 – Осередки утворення окалини та тріщини на передній кромці робочої лопатки турбіни як наслідок короткочасного перегрівання

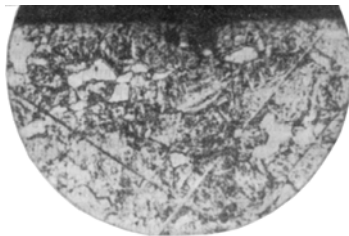


Рисунок 8.7 – Мікрошліф зони передньої кромки робочої лопатки турбіни з осередками утворення окалини та тріщини із-за короткочасного перегрівання

Утворення термічних тріщин знижує термічні напруження, і тому вони не розвиваються до повного руйнування лопаток без прикладання додаткових сил. Ріст тріщини до повного руйнування та швидкість її розповсюдження безпосередньо залежать від рівня механічного навантаження та від чутливості матеріалу до надрізу. Під

дією термічних напружень розтріскування лопатки може і не відбутися, але вони знижують довготривалу міцність матеріалу.

Під час експлуатації робочої лопатки турбіни виникають випадки оплавлення, обгорання та значного перегрівання лопаток. Причиною цього є ненормальна робота паливно-регулювальної апаратури, відмова системи теплового захисту, виникнення помпажу. Найбільш небезпечний випадок – це помпаж.

На рис.8.8 наведена обгоріла робоча лопатка турбіни.



Рисунок 8.8 – Вид обгорілої лопатки турбіни зі сторони спинки

Вибір матеріалу для робочих лопаток турбіни проводиться за характеристиками жароміцності (границя довготривалої міцності, границя повзучості). Також матеріал лопатки повинен чинити опір термовтомі (для ГТУ, що працюють в умовах швидких пусків і зупинок); добре протистояти ударним пошкодженням і мати знижену чутливість до надрізів в умовах дії статичного і втомного навантажень.

Матеріали для виготовлення робочих лопаток: жароміцні аустенітні сталі із карбідним або інтерметалідним зміцненням (09X14H19B2БР, 10X16H25, 10X11H20ТЗМР, ХН38Т (ЭИ703), ХН35ВТ (ЭИ612)); сплави на основі нікелю (ХН80ТБЮ (ЭИ607), ХН77ТЮР (ЭИ437Б), ХН70ВМТЮФ, ХН50МВКТЮР (ЭП99), ХН51ВМТЮКФР (ЭП220), ЖС3, ЖС6К, ЖС6У, ВЖЛ12, ЗМИ-3, ЧС70ВИ).

Приклад проведення експертизи причин руйнування робочої лопатки I ступені газової турбіни авіаційного ГТД

Лопатка виготовлена з жароміцного ливарного сплаву ЖС6К, температура експлуатації до 800-900°C. Термічна обробка:

гомогенізація та старіння. Структура γ -твердий розчин на основі нікелю + γ' -фаза. Для охолодження лопатки передбачені внутрішні канали. Під час довготривалої експлуатації відбулось руйнування лопатки в зоні каналів охолодження. Можлива причина руйнування: знелегування поверхневого шару каналів охолодження на хром та алюміній та розвиток тріщини від термічної втоми.

Знелегування супроводжується зміною фазового складу сплаву: відбувається зменшення кількості γ' -фази до її повного розчинення та наступне внутрішнє окислення γ -твердого розчину. На внутрішній поверхні каналу охолодження збільшується шар окислів, які мають більш низький коефіцієнт теплопровідності ніж основний метал, порушується тепловідвід лопатки. Це призводить до підвищення температури та прискорення процесів структурних перетворень і зменшення ресурсу лопатки.

Тріщина термовтоми зароджується на внутрішній поверхні каналів для охолодження і розвивається до поверхні лопатки з виходом на неї. Такий розвиток тріщини обумовлений градієнтом температур: під впливом розтягуючих напружень від зони з більш низькою температурою (внутрішня поверхня каналу) до зони з більш високою температурою (поверхня лопатки).

Розвиток тріщини від термовтоми супроводжується окисленням примезових об'ємів сплаву, що обумовлено підвищеною дифузійною рухомістю по межах зерен легувальних елементів та кисню, а також локалізацією в цих зонах пластичної деформації (від експлуатаційного навантаження). Тріщини від термовтоми не можна виявити ні одним методом неруйнівного контролю до моменту її виходу на поверхню.

Дослідження проводиться за допомогою наступних методів.

1. Неруйнівний метод контролю: ЛЮМ контроль – вивчається характер тріщини;

2. Металографічні методи:

- макроскопічний метод (фрактографія) – вивчається поверхня тріщини від термовтоми;

- мікроскопічний метод (електронна мікроскопія) – вивчається структура внутрішньої поверхні каналу для охолодження та структура лопатки;

Висновок: причина руйнування знелегування, окислення та розвиток тріщини від термовтоми.

Рекомендація: для захисту поверхні внутрішнього каналу від знелегування та наступного окислення і руйнування від термовтоми необхідно нанести на внутрішню поверхню дифузійні алюмінідні покриття.

Завдання на підготовку до лабораторної роботи

1. Ознайомитись з напруженим станом робочої лопатки газової турбіни.
2. Розглянути причини поломок робочих лопаток газової турбіни.
3. Вимоги до матеріалу робочої лопатки та матеріали, які використовуються для виготовлення робочих лопаток газової турбіни.

Контрольні питання

1. В яких умовах експлуатують робочі лопатки турбіни?
2. Поясніть з яких причин може відбуватись руйнування робочої лопатки турбіни ?
3. Які методи дослідження застосовують для виявлення причин руйнування робочої лопатки турбіни ?
4. Які рекомендації можна запропонувати для попередження руйнування робочої лопатки турбіни ?

Порядок виконання роботи

1. Провести експертизу причин руйнування робочої лопатки І ступені газової турбіни авіаційного ГТД, виготовленої з жароміцного сплаву ХН77ТЮР
2. Провести експертизу причин руйнування робочої лопатки І ступені газової турбіни авіаційного ГТД, виготовленої з жароміцного ливарного сплаву ЖС6К.
3. Провести експертизу причин руйнування робочої лопатки І ступені газової турбіни авіаційного ГТД, виготовленої з жароміцного ливарного сплаву ЖС3.

Матеріали, інструменти, прилади та обладнання

Лопатка з тріщиною. Добірка шліфів на зразках вирізаних з лопатки в місці утворення тріщини. Металографічний мікроскоп МІМ-7. Струмовихровий дефектоскоп. Фотографії мікроструктур даних сплавів.

Техніка безпеки

Робота виконується відповідно до загальної інструкції з техніки безпеки (додаток А).

Зміст звіту

1. Навести умови експлуатації робочих лопаток газової турбіни; причини поломок робочих лопаток та матеріали для виготовлення робочих лопаток газової турбіни.

2. Згідно проведених експертиз причин руйнування робочих лопаток газової авіаційної турбіни зробити висновки щодо причин поломки лопатки та навести рекомендації по попередженню поломки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Хільчевський В. В. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів: Навчальний посібник. К.: Либідь, 2002. — 328 с. ISBN 966-06-0247-2
2. Технологія конструкційних матеріалів та матеріалознавство : навч. посіб. / С.М. Уминський, Б. В. Лебедев, П. І. Осадчук, С. С. Житков ; Одес. держ. аграр. ун-т. — Одеса : ТЕС, 2020. — 180 с
3. Куцова В.З., Федоркова Н.М. Експертиза матеріалів та металів: Навч. посібник. – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2017. – 51 с.
4. Експертиза товарів: навч. посіб. /А.А. Дубініна, І.О. Дудла, М.Р. Мардар, С.В. Сорокіна, Т.М. Летута – Харків: ХДУХТ, 2017
5. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство. Практикум [Текст]: [навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. за напрямом «Інж. механіка»] / В. В. Попович, А. І. Кондир, Е. І. Плешаков та ін. — Львів: Світ, 2009. — 551 с. — ISBN 978-966-603-401-7
6. Матеріалознавство [Текст]: підручник / [Дяченко С. С., Дощечкіна І. В., Мовлян А. О., Плешаков Е. І.] ; ред. С. С. Дяченко ; Харківський нац. автомобільно-дорожній ун-т. — Х. : ХНАДУ, 2007. — 440 с. — ISBN 978-966-303-133-0
7. Кофанова О.С., Кофанов А.В., Кобилянський О.Л. Експертиза металів, сплавів та виробів з них. – Методичні рекомендації. – Київ: КИЙ, 2010. – 48 с. – (Серія „Криміналістичне забезпечення”).
8. Сучасні газотурбінні агрегати [Текст] : навч. посібник для студ. вищих навч. закл.: У 2 т. / Г. Ф. Романовський [и др.]. - Миколаїв : Національний ун-т кораблебудування ім. адмірала Макарова, 2005.
9. Конструкція, міцність та надійність газотурбінних установок і компресорів [Текст] : підруч. для студ. вищ. навч. закл. / М. С. Кулик, О. А. Тамаргазін, В. В. Козлов. - К. : Вид-во Нац. авіац. ун-ту "НАУ-друк", 2009. - 477 с. :
10. Загальна будова авіаційних двигунів [Текст] : консп. лекцій / О. І. Гаркуша. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2021. – 88 с.

Додаток А

Правила із техніки безпеки при виконанні лабораторних робіт

1. Роботу починають виконувати тільки з дозволу викладача.
2. До роботи з обладнанням допускаються особи, які вивчили конструктивні особливості та технічний опис конкретної випробувальної машини, а також пройшли перевірку знань електричної техніки безпеки.
3. На обладнанні механічної лабораторії можуть працювати особи, які пройшли інструктаж з техніки безпеки та мають допуск на право виконання робіт на обладнанні лабораторії.
4. В термічній та препараторських лабораторіях можуть працювати особи, які пройшли інструктаж з техніки безпеки та визначили конструктивні особливості печей та витяжних шаф. Всі струмопровідні частини електропечей повинні бути ізольовані та огорожені, а інші неструмопровідні частини – надійно заземлені.

Вимоги безпеки перед початком роботи

1. Вивчити інструкцію з виконуємої роботи.
2. Перевірити наявність необхідних приладів та інструментів.
3. Доповісти викладачеві про можливість виконання роботи.
4. Студенти не повинні приступати до роботи, доки не одержать інструктаж з техніки безпеки.
5. Робота біля електроприладів повинна виконуватись з використанням ізоляційних засобів (діелектричні килимки, ізоляційні підставки).
6. Перевірити справність приладів та обладнання печі, підготувати до роботи інструмент, вантажнозахватні пристрої та впевнитись в їх справності.
7. Завантаження та розвантаження виробів виконувати за допомогою спеціального захватного знаряддя.
8. Якщо встановлена несправність печі, необхідно повідомити викладача.
9. Проведення ремонту обладнання самостійно студентами забороняється.

Вимоги безпеки під час виконання роботи

1. Забороняється студентам вмикати та вимикати електричні прилади та електропечі без дозволу керівника лабораторних робіт.

2. Усякі ремонти, налагодження електрообладнання необхідно виконувати електромонтеру, що обслуговує лабораторію.

3. Забороняється працювати в лабораторії на самоті. Обов'язкова присутність керівника лабораторних робіт. Вмикання, зміна режимів роботи установки, проведення замірів та вимикання установки для запобігання несправностей, необхідно виконувати тільки з дозволу викладача в суворій відповідності з положенням, наведеному у технічному описанні.

4. Особам, які не закріплені за даною установкою, виконувати будь-які ремонтні роботи забороняється.

Вимоги безпеки в термічній та препараторських лабораторіях

1. Вмикання та вимикання електричного обладнання повинно здійснюватись тільки з дозволу викладача, який проводить заняття.

2. При виявленні несправності усіх видів слід негайно припинити роботу.

3. Забороняється ремонтувати обладнання студентам та особам, які не мають кваліфікаційної групи по ТБ.

4. Завантаження та розвантаження печей дозволяється тільки у вимкненому стані.

5. Працювати при несправному заземленні і без діелектричного килимка забороняється.

Вимоги безпеки після закінчення роботи

Після проведення випробувань в механічній лабораторії необхідно: відключити усі секції установок від електропостачання та вимкнути прилади.

В термічній та препараторських лабораторіях після закінчення робіт необхідно вимкнути печі, вимкнути вентиляцію, рубильник електропостачання, прибрати робочі місця.

Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях

При пожежі чи загорянні необхідно:

1. Викликати пожежну частину за телефоном 01.
2. Вимкнути електромережу, вентиляцію, обладнання.
3. Сповістити керівника лабораторії і викладача.
4. Негайно покинути приміщення лабораторії.