

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**Український державний університет
науки і технологій**

Кафедра «Матеріалознавства та
термічної обробки металів»

В авторській редакції

ВИБІР, ДИЗАЙН ТА ЕКСПЕРТИЗА МАТЕРІАЛІВ

Навчально-методичні рекомендації
до практичних занять
для студентів спеціальності G8 – матеріалознавство
ОПП «Матеріалознавство» (магістерський рівень)

Електронне видання

ДНІПРО
2025

УДК 620.1(076.5)

В 41

Упорядники:

Т. А. Аюпова, О. А. Носко, Т. В. Котова, Д. О. Коваль

Електронне видання

Схвалено Групою забезпечення якості освітньої програми

G8 Матеріалознавство

Протокол № 2 від 03.09.2025 р.

В 41 Вибір, дизайн та експертиза матеріалів : навчально-методичні рекомендації до практичних занять для студентів спеціальності G8 Матеріалознавство ОПП «Матеріалознавство» (магістерський рівень) / упоряд. Т. А. Аюпова, О. А. Носко, Т. В. Котова, Д. О. Коваль ; Укр. держ. ун-т науки і технологій. – Електрон. вид. – Дніпро : УДУНТ, 2025. – 42 с.

Навчально-методичні рекомендації розроблені з метою ознайомлення студентів з вимогами щодо змісту, виконання та оформлення практичних робіт. В методичних рекомендаціях викладено методи аналізу мікроструктури (SEM, TEM, XRD), випробувань механічних, фізичних та корозійних властивостей матеріалів. Розглянуто вибір раціонального матеріалу, технології його виробництва та контролю якості, а також методи дослідження зламів і оцінювання працездатності деталей.

Навчально-методичні рекомендації призначені для викладачів практичних занять та студентів спеціальності 132 – Матеріалознавство ОПП «Матеріалознавство» (магістерський рівень) денної та заочної форм навчання.

© Аюпова Т. А. та ін., упорядкування, 2025

© Укр. держ. ун-т науки і технологій, 2025

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №1	5
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №2	11
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №3	20
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №4	29
ЛІТЕРАТУРА.....	41

ВСТУП

Сучасний рівень розвитку техніки та технологій вимагає від інженерів і фахівців матеріалознавчої галузі глибоких знань про структуру, властивості та закономірності поведінки матеріалів в умовах експлуатації. Від правильного вибору матеріалів, їхнього раціонального використання та своєчасної експертизи залежить надійність і довговічність виробів у різних сферах промисловості. Тому підготовка студентів до практичного аналізу й оцінювання матеріалів є одним із ключових завдань навчального процесу.

Методичні рекомендації укладено з метою допомогти студентам у виконанні практичних робіт з дисципліни «Вибір, дизайн та експертиза матеріалів». У них подано загальні вимоги до оформлення й змісту робіт, визначено послідовність виконання завдань, наведено вказівки щодо підготовки та систематизації результатів. Особливу увагу приділено формуванню у студентів навичок аналізу структури та властивостей матеріалів, оцінювання їхньої придатності для конкретних умов використання, а також виявленню причин можливих руйнувань виробів.

Крім того, методичні рекомендації містять узагальнені теоретичні відомості, приклади практичного застосування та орієнтовні завдання для самостійної роботи студентів. Їхнє використання сприятиме більш глибокому засвоєнню навчального матеріалу, розвитку вмінь самостійного аналізу та формуванню професійних компетентностей у сфері матеріалознавства.

Опанування запропонованого матеріалу дозволить здобувачам освіти закріпити теоретичні знання, отримати практичний досвід у застосуванні методів аналізу, навчитися визначати вплив структури й умов експлуатації на поведінку матеріалів, формувати рекомендації щодо запобігання руйнуванням. Це сприятиме розвитку професійної майстерності майбутніх інженерів та підвищенню їхньої готовності до розв'язання прикладних завдань у галузі матеріалознавства та технічної експертизи.

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №1

МЕТОДИ АНАЛІЗУ МІКРОСТРУКТУРИ (SEM, TEM, XRD). МЕТОДИ ВИПРОБУВАНЬ МЕХАНІЧНИХ, ФІЗИЧНИХ, КОРОЗІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ.

1.1. Ціль роботи

Ознайомитися з сучасними методами аналізу мікроструктури матеріалів (SEM, TEM, XRD) та методами випробувань їхніх механічних, фізичних і корозійних властивостей. Навчитися визначати можливості, переваги та обмеження кожного з методів для подальшого обґрунтованого вибору під час вирішення інженерних і наукових задач.

1.2. Теоретичні відомості

Сучасне матеріалознавство неможливе без точних методів дослідження структури й властивостей матеріалів. Вони дають змогу зрозуміти, як мікроструктура впливає на експлуатаційні характеристики виробів — від арматури та будівельних конструкцій до труб і балонів, що працюють під тиском. Завдяки цьому можна своєчасно виявляти дефекти та прогнозувати довговічність матеріалів.

Доцільність застосування цих методів полягає у комплексному підході: SEM дозволяє аналізувати поверхню, TEM — внутрішню структуру на нанорівні, XRD — фазовий склад і кристалічну решітку, оптичні методи дають базове уявлення про макро- та мікроструктуру, а механічні, фізичні й корозійні випробування надають практичні дані про поведінку матеріалу в експлуатації. Це особливо важливо для будівництва, енергетики, транспорту та машинобудування.

Економічна доцільність таких досліджень очевидна: вони знижують ризик аварій і поломок, скорочують витрати на ремонт і заміну, подовжують термін служби конструкцій і обладнання. Таким чином, сучасні методи дослідження матеріалів — це не лише наукова потреба, а й практичний інструмент підвищення надійності й безпеки виробів.

Для всебічного вивчення властивостей матеріалів використовують низку методів, стислий огляд яких наведено далі.

Макроскопічний аналіз (макроаналіз). Макроскопічні методи передбачають вивчення будови та дефектів металів неозброєним оком або з використанням лупи з невеликим збільшенням [1]. Для цього використовують спеціально підготовлені макрошліфи, які дозволяють оцінити загальний характер кристалізації, напрям волокон після деформації, наявність тріщин, порожнин і зон неоднорідності. Макроаналіз особливо цінний при контролі великих виробів — зварних швів труб і балонів, кованих чи литих деталей, будівельних елементів (арматурних стрижнів, профільних балок). Його перевага — простота й швидкість, а недолік — відсутність точних кількісних характеристик і низька чутливість до дрібних дефектів.

Оптична мікроскопія (мікроскопічний аналіз). Оптична мікроскопія є базовим методом дослідження мікроструктури металів і сплавів. Для цього зразок попередньо готують: шліфують, полірують і травлять спеціальними реактивами, які вибірково проявляють межі зерен і фазові складові [1]. У відшліфованому й протравленому стані під світловим мікроскопом можна дослідити форму, розмір і розташування зерен, наявність включень і неоднорідностей. Метод є простим, доступним і дозволяє швидко отримати інформацію про загальний характер структури. Його активно застосовують для контролю якості будівельної арматури, пружин, інструментів і труб, де важливі однорідність структури та відповідність стандартам. Основним обмеженням є невисока роздільна здатність у порівнянні з електронною мікроскопією (SEM, TEM).

Сканувальна електронна мікроскопія (SEM). SEM є одним із найважливіших інструментів сучасного матеріалознавства, що дозволяє досліджувати поверхневу морфологію матеріалів з високою роздільною здатністю [1]. Принцип методу полягає у взаємодії сфокусованого електронного пучка з поверхнею зразка, внаслідок чого виникає вторинне випромінювання, яке реєструється детекторами. За його інтенсивністю та розподілом формується зображення поверхні. Метод дозволяє виявляти дефекти, пори, мікротріщини, а також аналізувати розмір і форму зерен. SEM часто використовується для оцінки якості зварних швів, контролю структури труб, балонів та інших виробів, що працюють під тиском. До переваг належить

можливість поєднання із спектральним аналізом (EDS), який дає інформацію про хімічний склад окремих ділянок поверхні. Обмеженням є необхідність ретельної підготовки зразків і неможливість спостереження товщинних внутрішніх структур.

Просвічувальна електронна мікроскопія (ТЕМ). ТЕМ дозволяє проводити дослідження внутрішньої структури матеріалу на нанорівні, зокрема виявляти дислокації, межі зерен, нанофази та дефекти кристалічної решітки. Метод ґрунтується на проходженні електронного пучка крізь надтонкий зразок, товщина якого зазвичай не перевищує кількох сотень нанометрів [1]. Завдяки цьому досягається надзвичайно висока роздільна здатність – аж до атомного масштабу. ТЕМ широко застосовують у дослідженні високотехнологічних матеріалів: спеціальних сталей, титанових і алюмінієвих сплавів, наноматеріалів. Для труб і балонів метод корисний при виявленні мікродефектів, що можуть призвести до розвитку тріщин під дією навантажень. Основним недоліком є складна підготовка зразків і висока вартість обладнання.

Рентгеноструктурний аналіз (XRD). XRD використовується для визначення фазового складу, кристалічної структури та параметрів кристалічної решітки матеріалів [1-2]. Принцип методу базується на явищі дифракції рентгенівських променів, що проходять крізь кристалічні ґратки. Отримані дифрактограми дозволяють визначити, які фази присутні в матеріалі, їх кількісне співвідношення та ступінь напруженості ґратки. У будівельних сталях (арматура, профілі, труби) XRD дозволяє контролювати наявність небажаних фаз, які можуть знижувати міцність або корозійну стійкість. Для балонів, що працюють під високим тиском, цей метод допомагає визначати ступінь залишкових напружень після термообробки. Перевагою XRD є не руйнівність.

Механічні випробування. Механічні методи включають стандартні випробування на розтяг, стискання, вигин, крутіння, визначення твердості та ударної в'язкості [3-4]. Випробування на розтяг дозволяють встановити межу текучості, тимчасовий опір та відносне подовження матеріалу, що є критично важливими параметрами для труб і балонів. Визначення твердості (за Брінеллем, Роквеллом, Віккерсом) дає уявлення про опір матеріалу пластичній деформації, а випробування на ударну в'язкість показує, як матеріал

поводиться при динамічних навантаженнях. Ці методи особливо актуальні для будівельної арматури, ресор і пружин, інструменту, які працюють у змінних навантажувальних умовах. Перевага механічних випробувань – простота та стандартизованість, недолік – руйнування зразків.

Фізичні методи випробувань. До цієї групи належать дослідження електропровідності, теплопровідності та магнітних властивостей матеріалів. Для конструкційних сталей вони менш критичні, проте для спеціальних виробів (наприклад, теплообмінних труб) теплопровідність має ключове значення. Методи вимірювання базуються на стаціонарних і нестаціонарних теплових режимах, а електропровідність зазвичай визначають за допомогою чотирьохзондового методу. Дані випробування допомагають не лише охарактеризувати матеріал, а й виявити приховані дефекти чи відхилення у складі сплаву. Обмеження полягає у необхідності використання спеціалізованих установок [5].

Корозійні випробування. Корозія є одним із головних чинників руйнування металевих виробів у будівництві та промисловості. Методи дослідження корозійної стійкості включають експозиційні випробування у природних або штучно створених агресивних середовищах, а також електрохімічні методи (поляризаційні криві, потенціостатичні вимірювання). Для арматури важливим є вивчення стійкості у лужних і хлоридвмісних середовищах, для труб і балонів – у середовищах води, нафти, газів під тиском. Результати дозволяють прогнозувати довговічність виробів та вибрати оптимальні захисні покриття чи легуючі добавки. Недолік таких випробувань – значна тривалість експериментів у випадку натурних досліджень.

1.3. Порядок проведення роботи

Об'єкт дослідження: виріб обирається за завданням викладача (таблиця 1.1).

1.3.1. Коротко розглянути принципи SEM, TEM, XRD та механічних, фізичних, корозійних методів. Визначити, які методи найдоцільніші для даного виробу.

1.3.2. Дослідження мікроструктури виробу. Визначити за стандартом структуру, дефекти. Обрати відповідний метод (SEM, TEM, XRD) залежно від виробу.

1.3.3. Аналіз механічних властивостей. Вибрати, які випробування (розтяг, твердість, ударна в'язкість) найінформативніші для заданого виробу.

1.3.4. Оцінка фізичних властивостей. Визначити, які властивості (теплопровідність, електропровідність) мають значення для виробу та як їх виміряти.

1.3.5. Корозійна стійкість. Визначити тип можливої корозії. Обрати методи оцінки (натурні, прискорені, експозиційні, електрохімічні тощо).

1.3.6. Узагальнити результати. Заповнити таблицю 1.2. Зробити висновки щодо доцільності застосування методів для виробу.

Таблиця 1.1 – Металеві вироби для дослідження

№ варіанту	Металевий виріб	№ варіанту	Металевий виріб
1	Арматура будівельна (сталева)	15	Автомобільна ресора
2	Арматура для попередньо напружених конструкцій	16	Залізнична ресора
3	Молоток (інструментальна сталь)	17	Тарілчаста пружина (дискова)
4	Зубило	18	Пружина клапанна (двигунна)
5	Свердло	19	Пружина годинникова
6	Ніж токарний (різець)	20	Арматура з нержавіючої сталі
7	Пила ручна	21	Арматура з високоміцної сталі
8	Пружина стискання (сталева)	22	Ножиці металеві (інструмент)
9	Пружина розтягу	23	Ключ гайковий
10	Пружина крутильна (торсіонна)	24	Викрутка
11	Сталева труба водопровідна	25	Напилек для обробки м'яких металів
12	Труба нержавіюча для харчової промисловості	26	Фреза черв'ячна
13	Труба котельна (для високих температур)	27	Різець відрізний
14	Балон високого тиску (200–300 атм)	28	Мітчик для твердих металів

Таблиця 1.2 – Зведена таблиця методів дослідження та контролю властивостей металевих виробів

Виріб	Основні властивості для контролю	Методи дослідження	Можливості	Обмеження

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №2

ВИБІР ТА ОБГРУНТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНОГО МАТЕРІАЛУ, ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА ТА КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ЗАДАНОГО ВИРОБУ

2.1. Ціль роботи

Набути навичок аналізу експлуатаційних умов роботи виробів, здійснити обґрунтований вибір марки сталі за комплексом властивостей та економічними показниками, вивчити вплив легуючих елементів на властивості сталі, а також засвоїти принципи вибору методів контролю якості залежно від умов експлуатації виробу.

2.2. Теоретичні відомості

Професійний обов'язок матеріалознавця-технолога — вміти технічно грамотно й обґрунтовано обирати матеріал для конкретної деталі та визначати технологію її виготовлення [6].

Перед вибором матеріалу здійснюється збір і аналіз даних про конструкцію чи агрегат: причини відмов і поломок, новизну виробу, роль матеріалу (визначальна чи другорядна), обсяги виробництва, економічні чинники.

Процес відбору матеріалу підпорядковується певному алгоритму:

1. Оцінка умов роботи деталі та визначення необхідних властивостей (міцність, пластичність, електропровідність, зварюваність тощо).
2. Вибір групи матеріалів (конструкційні сталі, інструментальні, спеціальні сплави, чавуни, кольорові метали).
3. Урахування економічних міркувань: віддавати перевагу менш легованим і дешевшим сталям, а дорогі сплави (з Ni, Mo, W, V тощо) використовувати лише за неможливості заміни.

4. Урахування технологічних властивостей, що дозволяє знизити трудомісткість і витрати.

5. Визначення режимів термічної, механічної, хіміко-термічної обробки, що дають змогу керувати властивостями матеріалу.

Раціональний вибір матеріалу вважається таким, коли при мінімальному легуванні досягається потрібна міцність, довговічність, корозійна стійкість тощо, а вартість матеріалу й технології не перевищує економічного ефекту від підвищення надійності та зниження витрат.

Джерелами інформації для матеріалознавця є довідники, наукові публікації, комп'ютерні бази даних [6-7]. Вони допомагають порівняти властивості й знайти найбільш відповідний варіант, хоча остаточне рішення завжди індивідуальне та залежить від конкретної ситуації.

Наведені нижче довідкові дані відображають найбільш відомі промислові матеріали та сфери їх практичного застосування (таблиця 2.1 – 2.5)

Таблиця 2.1 - Конструкційні сталі

Призначення матеріалу	Рекомендовані марки
Сталі, що застосовуються без термічної обробки або у відпаленому (нормалізованому) стані. Гарна зварюваність	08кп, 10кп
Листи, що штампуються в холодному стані з глибокою витяжкою	Ст2, Ст3
Заклепки, жорсткі з'єднання	10, 20
Водопровідні труби	Ст5
Осі не відповідального призначення	26
Цементовані сталі	
Деталі, що не потребують високої міцності серцевини: зубчасті колеса, шестерні, пальці шарнірів, черв'яки, муфти, гаки, тяги	15, 20, 15Х, 20Х
Подібні деталі більш складної форми, нечутливі до перегріву при цементациї	15ХА, 15ХФ
Деталі з високою міцністю і в'язкістю серцевини, великі перерізи: шестерні, осі, вали	12ХН3А, 12Х2Н4А, 20ХН
Траки, шестерні з меншою в'язкістю серцевини	18ХГТ, 18ХГ
Поліпшувані сталі	
Сталі, що гартуються у перерізах до 15 мм. Осі, вали, штоки, шестерні, болти відповідального призначення	35, 40, 45, 50
Сталі, що гартуються у перерізах 25–30 мм. Колінчасті вали, осі, цапфи, вагонні осі, шатуни	35Г2, 45Г2
Осі, вали, шестерні, тонкостінні труби, вали високої міцності	35Х, 40Х, 45Х, 30ХМ, 30ХС, 20ХГС, 40ХС, 40ХФА

Призначення матеріалу	Рекомендовані марки
Сталі, що гартуються у перерізах 35–50 мм. Вали, шестерні, болти, шпильки відповідального призначення, циліндри моторів	30ХГСА, 35ХМ, 40ХН, 40ХГТР
Сталі, що гартуються у перерізах 50–100 мм. Вали, штоки, важконавантажені вали, кривошипи високої міцності	20Х2Н4А, 30ХН3А, 40ХНМ, 38ХН3МА
Сталі, зміцнювані поверхневим гартуванням при індукційному нагріві. Вали, осі, шестерні	35, 40, 55, 60
Подібні деталі, але більшого розміру	45Х, 50Х
Ті ж деталі, але при підвищених напруженнях	58 (55ПП)
Будівельні низьколеговані сталі	
Стійки ферм, обв'язки вагонів, балки та інші деталі вагонобудування, деталі екскаваторів, елементи зварних металоконструкцій	09Г2, 09Г2С
Зварні конструкції (корпуси посудин, апаратів, днища, фланці й частини парових котлів), що працюють під тиском, нафтопроводи і газопроводи	14Г2, 17ГС, 15ГФ
Конструкції естакад, ферми, балки перекриттів, колони, стійки, мости для транспорту, суднобудівні конструкції	15Г2СФ, 14Г2АФ, 10ХСНД, 15ХСНД
Арматурні стержні	20ГС2, 23Х2Г2Т
Сталі підвищеної оброблюваності (автоматні сталі)	
Осі, валики, втулки, шестерні, пальці, гвинти, болти та інші малонавантажені дрібні деталі складної форми, що обробляються на автоматах	A12, A20
Осі, валики, втулки, шестерні, пальці, гвинти, шестерні, болти, кільця та інші високо навантажені деталі складної форми, що обробляються на автоматах	A30, A40Г, АС40, АС30ХМ, АС35Г2
Азотовані сталі	
Шпинделі швидкохідних верстатів, стакани циліндрів, шестерні, болти відповідального призначення	38ХМЮА, 40ХНМА
Сталі, що застосовуються в сільськогосподарському машинобудуванні	
Лемеші, ножі, відвали	55С2, 65Г, У9
Рами	10
Пружинні сталі	
Ресори автомобілів, пружини рухомого складу залізничного транспорту, пружини великих пресів	55С2, 65Г, 50ХГ
Пружини особливо відповідального призначення	50ХФА, 55ХГСФА
Пружини годинникових механізмів	70С2ХА
Корозійностійкі пружини	65Х13
Сталі для залізничного транспорту	
Рейки залізничні	76, 76Ф, 76Т
Суцільнокатані залізничні колеса і бандажі	60ГФ
Автозчіпні пристрої	20ГЛ
Стикові з'єднання рейок	54
Кріогенні сталі	
Резервуари для зріджених газів з температурою до –160 °С	ОН6
Вироби, що працюють при температурах до –196 °С	ОН9, 12Х18Н9Т, 03Х13АГ19

Продовження табл. 2.1

Призначення матеріалу	Рекомендовані марки
Ті ж, але з робочою температурою до $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$	08X18H10T, 03X20H16AG6
Підшипникові сталі	
Кульки, ролики, кільця шарико- і роликотідшипників, плунжери, втулки, корпуси розподільників, нагнітальні клапани	ШХ15, ШХ15СГ, ШХ20СГ, ШХ4
Те ж для роботи в агресивних середовищах	95X18Ш, 11X18ВД
Те ж для роботи при температурах до $500\div 650\text{ }^{\circ}\text{C}$	8X4B9Ф2Ш, 8X4M4Ф1Ш

Таблиця 2.2 - Інструментальні сталі

Приблизне призначення матеріалу	Рекомендовані марки
Нетеплостійкі сталі підвищеної в'язкості	
Пневматичні долота, зубила, сокири, молотки по дереву і металу, шаблони	У7, У7А, 7ХФ
Чеканочні штампи	6Х3ФС
Нетеплостійкі сталі підвищеної твердості	
Висадкові штампи, витяжні, мітчики для різання м'яких матеріалів	У10, У10А, У12, У13
Витяжні штампи, різьбові калібри, лекала складної форми	Х (ШХ15)
Круглі плашки, пилки по дереву, свердла, різці для обробки латуней (робоча температура до $200\text{ }^{\circ}\text{C}$)	ХВСГ, 9ХФ, 9ХС
Штампи для холодного штампування	ХГС, ХГСФВ, ХГ3СВ
Штампи для холодного штампування	Х12Ф, Х12Ф1, Х12М
Теплостійкі сталі підвищеної твердості	
Вирубні, витяжні штампи, штампи для чеканки мідних сплавів, матриці пресування, фільєри	Х12Ф1, Х12М
Подібний інструмент, але стійкий до корозії	Х18МФ
Сталі підвищеної в'язкості	
Великі молотові штампи для гарячого штампування	5ХНВ, 5ХНМ
Великі молотові штампи, що працюють при більш високому нагріві	3Х2НМВФ
Штампові сталі підвищеної в'язкості	
З помірною теплостійкістю: штампи, форми лиття під тиском	4Х5МФС, 4Х5В2ФС
З підвищеною теплостійкістю: пуансони видавлювання і прошивні	3Х2В8, 4Х3ВФ2М2
З високою теплостійкістю: пуансони видавлювання, кільця, накатники для деформування металу при $650\text{--}750\text{ }^{\circ}\text{C}$	5Х3В3МФ
Бистрорізальні сталі високої твердості	
З помірною теплостійкістю: протяжки, фрези, свердла, мітчики, різці, долбяки	Р6М5, Р9, Р12, Р18
З підвищеною теплостійкістю: розгортки, протяжки для обробки	Р12Ф3

Приблизне призначення матеріалу	Рекомендовані марки
конструкційних сталей	
Для різання жароміцних і нержавіючих сталей і сплавів	P12Ф4К5, P8M3K6C
Тверді сплави	
Точіння чавуну чистове безперервне	BK3
Точіння чавуну, кольорових металів (чистове переривчасте та чорнове безперервне)	BK6
Обробка аустенітних сталей, твердих чавунів, буріння гірських порід	BK6-M, BK6-B
Буріння гірських порід, волочіння сталі	BK15
Чистове точіння (безперервне), фрезерування сталей	T15K6, T5K10
Штампи при підвищеному зносі та невеликих ударних навантаженнях	BK20
Штампи при великих ударних навантаженнях	BK25

Таблиця 2.3. Чавуни

Приблизне призначення матеріалу	Рекомендовані марки
Сірі чавуни	
Деталі не відповідального призначення: кришки, шківни	СЧ12, СЧ15 (феритна основа)
Станини верстатів і механізмів, поршні, циліндри	СЧ18, СЧ20 (ферито-перлітна основа)
Деталі, що працюють на зношування: гальмівні барабани, циліндри, шестерні	СЧ25, СЧ30, СЧ35 (перлітна основа)
Ковкі чавуни	
Гальмівні колодки, фланці, муфти	КЧ35-10, КЧ37-12 (феритна основа)
Задній міст, картер автомобіля, маточини	КЧ45-7 (ферито-перлітна основа)
Високоміцні чавуни з кулястим графітом	
Траверси пресів, фланці, циліндри, шестерні	ВЧ50 (феритна основа)
Поршні, циліндри	ВЧ80 (перлітна основа)
Прокатні валки, робочі частини розмольного обладнання	Відбілений чавун (на поверхні цементит і перліт, НВ 300–450)

Таблиця 2.4 - Жаростійкі, жароміцні, корозійностійкі та зносостійкі сталі й сплави

Приблизне призначення матеріалу	Рекомендовані марки
Жаростійкі сталі та сплави	
Деталі котельних установок, труби, що працюють при температурах до 450 °С	X5
Те ж, при 600 °С	X6CM
Клапани випуску автомобільних і тракторних двигунів	4X9C2

Продовження табл. 2.4

Приблизне призначення матеріалу	Рекомендовані марки
Клапани випуску поршневих двигунів	30X30H7C2
Труби піролізних установок	15X28
Пічні конвеєри, ланцюги, труби, листи	20X20H14C2
Жароміцні сталі та сплави	
Робоча температура до 550 °С: труби, арматура парових котлів	15XM, 12X1M1Ф
Труби нафтових установок, стійкі проти водневої корозії	20X3MBФ
Робоча температура до 600 °С: апаратура переробки нафти, деталі насосів, клапани двигунів	X5M, X6CM, 4X10C2M
Лопатки парових турбін	0X13, 20X12BM
Труби, деталі пічної арматури, теплообмінники, муфелі	12X18H10T
Робоча температура вище 600 °С: клапани до 650 °С	40X14H14B2M
Лопатки, диски до 750 °С	XH77TIOP
Лопатки турбокомпресора до 850 °С	XH56BMKYU
Робочі та соплові лопатки турбін високого тиску авіаційних ГТД до 1150 °С	ЖС6, ЖС6К, ЖС26, ЖС32
Корозійностійкі сталі	
Лопатки турбін, арматура крекінг-установок	12X13
Хірургічні інструменти, голки	40X13, 95X18
Баки, труби, стійкі в морській воді (добра зварюваність)	12X18H10T
Зносостійкі сталі	
В умовах кавітаційної ерозії: лопаті гідротурбін і насосів	30X10Г10
Гребні гвинти, лопаті гідротурбін, стійкі в морській воді	08X14АГ12М
В умовах ударно-абразивного зношування: щоки й футеровки каменедробарок, шари, траки гусеничних машин, хрестовини рейок	110Г13Л
В умовах ударного та корозійно-абразивного зношування: насоси для перекачування кислотних розчинів	ЧХ260Х17М3, ЧХ250Х28Н2
Мартенситностаріючі сталі особливо високої міцності й в'язкості	
Баки, труби криогенного призначення, деталі літаків	03Н18К9М5Т
Деталі хімічної апаратури	08Х12Н10Д2Т
Пружини	03Х12Н8К5М2ТЮ

Таблиця 2.5 - Кольорові сплави

Приблизне призначення матеріалу	Рекомендовані марки
Підшипникові сплави	
М'які антифрикційні сплави (для заливки вкладишів підшипників ковзання)	Олов'яні бабіти: Б83, Б88; Свинцеві бабіти: БС, Б6
Прості латуні	
Листи, стрічки, труби	Л96, Л80, Л68 («патронна»)
Ювелірні та декоративні вироби	Л90 («томпак»)
Те ж, але пластичність нижча, а оброблюваність різанням вища	ЛС59-1
Спеціальні латуні, стійкі проти корозії	

Продовження табл. 2.5

Приблизне призначення матеріалу	Рекомендовані марки
Масивне лиття в суднобудуванні	ЛМЦЖ55-3-1
Литі шестерні, зубчасті колеса	ЛМЦОС58-2-2-2
Виливки в морському та загальному машинобудуванні	ЛА67-2,5
Бронзи	
Шестерні, втулки, підшипники	БрОЦ10-2, БрС30, БрО10Ф1
Арматура і шестерні для роботи в морській воді	БрАЖ9-4
Те ж саме для роботи при великому тиску і терті	БрАЖН10-4-4
Високоміцні та струмопровідні пружини, мембрани, сильфони, пружні контакти	БрБ2, БрБНТ1,7
Смуги для виготовлення монет	БрА5
Пружини, ковзні контакти	БрА7
Мідно-нікелеві сплави	
Медичний інструмент, розмінна монета, нагородні вироби	МН19 (мельхіор)
Художні вироби, столові прибори, плоскі пружини, парова і водяна арматура	МНЦ15-20 (нейзильбер)
Смуги для виготовлення пружин та інших виробів в електротехніці	МНА6-1,5 (куніаль)
Алюмінієві сплави	
1. Деформовані, зміцнювані термообробкою: лонжерони літаків, лопаті	В95
Труби, прутки, заклепки підвищеної міцності	Д16, Д18
2. Деформовані, не зміцнювані термообробкою: поршні двигунів, кільця, лопатки компресора	АК2, АК4
Зварні баки, трубопроводи	АМг2
Бензино- і маслопроводи, зварні баки	АМц, АМг6
3. Ливарні сплави: деталі коліс, агрегатів і приладів малої навантаженості	АЛ2
Деталі тонкостінні та складної форми невеликої й середньої навантаженості	АЛ7, АЛ9
Магнієві сплави	
Арматура, деталі корпусів насосів, ручки, педалі	МЛ3, МЛ5
Теплостійкі для роботи до 250 °С	МЛ10
Теплостійкі для роботи до 400 °С	МЛ15
Титанові сплави	
Висока пластичність і міцність до 1200 МПа при 20 °С	ВТ15
З підвищеною стійкістю проти корозії	ВТ8, ВТ3
З доброю пластичністю і міцністю до 900 МПа	ВТ6
З високою зварюваністю, доброю пластичністю та міцністю при низьких температурах	ВТ5

2.3. Порядок проведення роботи

При виборі сталей виходять із загальних експлуатаційних, технологічних та економічних вимог до деталей машин і конструкцій. При цьому міркування економічної доцільності, пов'язані з вибором матеріалу та його технологічної обробки, повинні бути враховані при розв'язанні подібного інженерного завдання.

За наступним алгоритмом здійснити вибір раціональної марки сталі для виготовлення заданого виробу:

2.3.1. Проаналізувати умови експлуатації виробу:

- вид навантаження (статичне, динамічне, ударне);
- робоча температура (звичайна, підвищена, низька/криогенна);
- агресивність середовища (волога, корозійна, контакт із кислотами, морською водою тощо);
- вимоги до довговічності та надійності.

2.3.2. Визначити функціональні вимоги до матеріалу:

- необхідний рівень міцності, пластичності, твердості, теплостійкості;
- стійкість до зношування, корозії, окалиноутворення;
- можливість проведення термічної обробки (загартування, цементация, нормалізація тощо).

2.3.3 Визначити технологічні вимоги до матеріалу:

- зварюваність;
- оброблюваність різанням, тиском, ливарні властивості;
- можливість поверхневого зміцнення;
- сумісність із вибраною технологією виготовлення виробу.

2.3.4. Виконати вибір групи сталей:

- конструкційні вуглецеві;
- леговані конструкційні;
- інструментальні;
- спеціальні (жароміцні, корозійностійкі, підшипникові тощо).

2.3.5. Обрати раціональну сталь та обґрунтувати її вибір:

- обрати конкретну марку за довідковими таблицями;
- проаналізувати вплив легуючих елементів (C, Cr, Ni, Mo, V тощо) на властивості;

– порівняти декілька можливих марок і обґрунтування остаточного рішення.

2.3.6. Виконати економічне обґрунтування

- доступність і вартість сталі;
- економія легуючих елементів;
- співвідношення «вартість – термін служби – надійність».

2.3.7. Призначити методи контролю якості

- механічні випробування (на розтяг, ударну в'язкість, твердість);
- фізико-хімічні та корозійні випробування;
- неруйнівний контроль (ультразвуковий, магнітопорошковий, капілярний).

2.3.8. Сформулювати висновок:

- обґрунтувати правильність вибору сталі;
- підтвердити відповідність експлуатаційним і технологічним вимогам;
- провести оцінку економічної ефективності.

Результати занести в таблиці 2.6 – 2.9

Таблиця 2.6 – Аналіз виробу

Виріб	Умови експлуатації	Основні вимоги до матеріалу

Таблиця 2.7 – Порівняння сталей за механічними властивостями

Марка сталі	Міцність (σ_b , МПа)	Твердість (НВ)	Пластичність (%)	В'язкість (КСУ, кДж/м ²)

Таблиця 2.8 – Порівняння сталей за технологічними властивостями

Марка сталі	Зварюваність	Оброблюваність різанням	Термообробка

Таблиця 2.9 – Порівняння економічної доцільності використання

Марка сталі	Вартість, грн/т	Довговічність (умовні бали)	Ефективність «вартість/ресурс»	Загальна оцінка

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №3

ВІЗУАЛЬНИЙ ТА МІКРОСКОПІЧНИЙ ОГЛЯД ПОВЕРХНІ ЗЛАМУ. МІКРОСКОПІЧНЕ ВИВЧЕННЯ БУДОВИ ПОВЕРХНІ ЗЛАМІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ОПТИЧНОГО МІКРОСКОПА. БУДОВА ЗЛАМІВ МЕТАЛІВ. ПЛАСТИЧНІ ТА КРИХКІ ЗЛАМИ

3.1. Ціль роботи

Ознайомитися з характерними ознаками в'язких та крихких зламів металів, навчитися визначати їх за макро- та мікроскопічними ознаками, а також оцінювати вплив умов навантаження на характер руйнування.

3.2. Теоретичні відомості

Класифікація руйнувань за ступенем пластичної деформації, що передують руйнуванню [8-9]. Залежно від цього показника всі матеріали можуть руйнуватися за двома механізмами:

- в'язкий – зародженню тріщини передують значна пластична деформація;
- крихкий – тріщина виникає без попередньої пластичної деформації.

Механізми утворення тріщин можна відтворити кривими (рис. 3.1), де:

- σ – напруження деформації;
- $\sigma_{0,2}$ – межа плинності – найменше напруження, за якого деформація зразка триває без помітного збільшення навантаження;
- σ_v – межа міцності;
- Δl – видовження зразка при деформації;
- l – початкова довжина зразка;
- $\Delta l/l$ – відносна деформація.

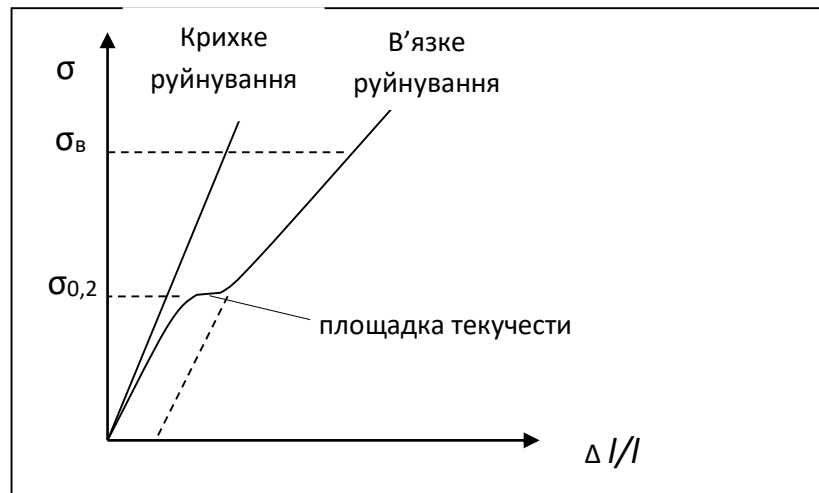
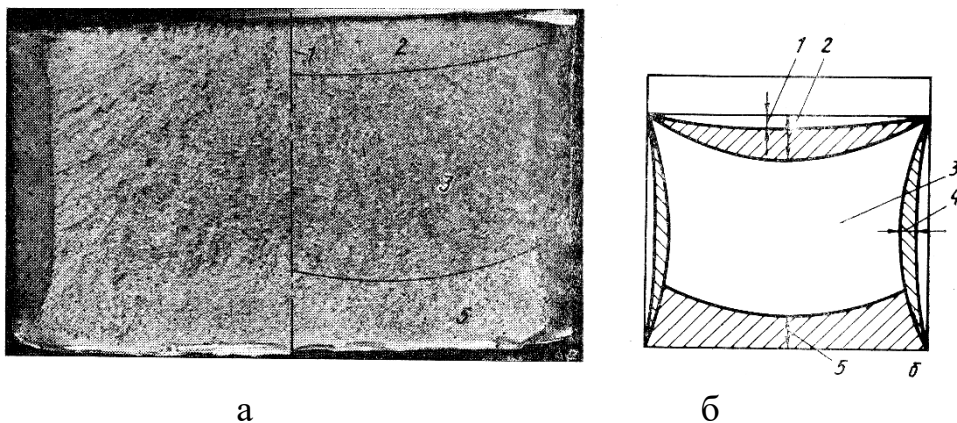


Рисунок 3.1 – Діаграми деформації та руйнування крихких та в'язких матеріалів

Злам – це поверхня руйнування твердого тіла (рис. 3.2–3.4). Ділянку зламу, у якій відбулося зародження тріщини, називають осередком руйнування. Ділянку зламу, прилеглу до осередку зародження тріщини, називають зоною зародження тріщини. Ділянку зламу, що знаходиться на віддалі від осередку зародження тріщини, називають зоною розвитку тріщини.



а

б

а – вигляд зламу; б – схема зламу:

1 – осередок руйнування; 2 – зона зародження тріщини; 3 – зона розвитку тріщини; 4 – стяжка зламу; 5 – зона долому.

Рисунок 3.2 – Будова зламу

Ділянку зламу, прилеглу до завершення тріщини на поверхні зразка,

протилежній осередку зародження тріщини, називають зоною долому. Стяжка зламу оцінюється величиною максимальної деформації за двома бічними площинами, паралельними до напрямків прикладеного зусилля.

Розрізняють тріщини первинні, тобто такі, що поширюються з осередку руйнування і утворюють поверхню руйнування, та вторинні, тобто такі, що поширюються з окремих центрів руйнування, розташованих на поверхні зламу. Вторинні тріщини є поперечними відносно площини первинного зламу [9].

Тріщини, як правило, починають розвиватися у ряді зон і напрямків, але лише в одній (рідше у кількох зонах) відбувається основний розвиток. Решта тріщин залишаються у більш чи менш розвиненому стані поза зоною повного руйнування. Тріщину, по якій пройшло повне остаточне руйнування, називають магістральною, решту тріщин – поодинокими.

Утворення поверхні руйнування відбувається внаслідок:

- розвитку кількох тріщин зі змінною швидкістю – у результаті виникають нерівності;
- злиття поруч розташованих тріщин в одну магістральну тріщину – тоді структура зламу може мати анізотропію.

Унаслідок цього процесу вигляд рубців і сходинок зумовлений також випадковими чинниками (наявністю дефектів у матеріалі). Тому під час вивчення профілю поверхні зламу слід звертати увагу на вибір правильного напрямку профілювання.

Деформація або руйнування відбуваються й розвиваються у часі за умови досягнення під час навантаження певної визначеної величини, яка зазвичай виражається у напруженнях. Для настання пластичної деформації (або руйнування) навантаження повинно викликати напруження, щонайменше рівні за величиною опору матеріалу.

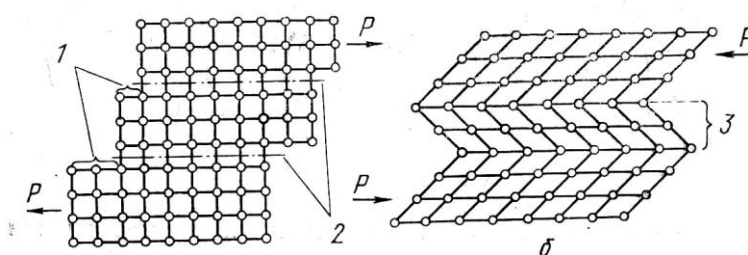
Під час аналізу будови зламів важливим є не лише початок, а й розвиток процесу деформації та руйнування.

Руйнування матеріалів – це процес розриву атомних зв'язків і утворення внаслідок цього внутрішньої поверхні розділу [8].

Процесу зародження тріщини передують пластична деформація матеріалу, яка може змінюватися в межах від $10^{-40}\%$ (для особливо крихких матеріалів) до $10^{30}\%$ (для особливо пластичних матеріалів). При цьому в зернах відбувається взаємний зсув окремих їх об'ємів або шарів уздовж певних напрямків, площин

кристалічної ґратки, де атоми в зсунутих рядах переміщуються не одночасно, а послідовно.

Деформація матеріалів може відбуватися за двома механізмами – ковзанням і двійникуванням. При ковзанні атоми зміщуються на відстань, кратну міжатомній відстані (рис. 3.3 а). При двійникуванні зерно (кристаліт) розділяється площиною двійникування на дві частини, причому кристалічна ґратка однієї з них стає дзеркальним відображенням ґратки другої (рис. 3.3 б). При цьому атоми можуть зміщуватися на відстань, не кратну міжатомній відстані в недеформованій ґратці.



1 — сходинок ковзання; 2 — площини ковзання; 3 — двійникова прошарка.

Рисунок 3.3 - Пластична деформація ковзанням (а) і двійникуванням (б)

У будь-якій кристалічній ґратці існують площини найбільшої упаковки атомів, сили зв'язків між якими менші, ніж між іншими площинами. При прикладанні зовнішнього навантаження деформація насамперед відбуватиметься у напрямку площин найбільшої упаковки атомів. Рух атомів неминуче призводить до виникнення дефектів структури (лінійних дислокацій – крайових і гвинтових). Рух дислокацій значно полегшує процес деформації, оскільки створює умови для взаємного заміщення атомів у кристалічній ґратці. Рух дислокацій створює умови для деформації матеріалу за сталого напруження σ , що призводить до утворення площадки текучості на діаграмі розтягу.

Текучість (пластична деформація) матеріалу припиняється тоді, коли задіяні всі площини найбільшої упаковки та кількість дислокацій, здатних рухатися у цьому напрямку, досягає максимуму [9].

Подальша деформація матеріалу можлива лише за рахунок зсуву атомів, які лежать в інших площинах, що потребує додаткового зусилля. Цим

пояснюється зміцнення матеріалу в інтервалі значень напружень $\sigma_{0,2}$ і σ_v .

При збільшенні напруження вище межі міцності в матеріалах виникають несуцільності, які називають тріщинами. Оскільки деформація матеріалу відбувається нерівномірно, тріщини утворюються найчастіше поблизу дефектів кристалічної будови, де рух дислокацій утруднений.

Тріщина знімає напруження в осередку деформації і, відповідно, зменшує енергію системи. З іншого боку, утворення тріщини пов'язане з формуванням нових поверхонь розділу, що, у свою чергу, збільшує енергію системи. Оскільки ріст тріщини супроводжується збільшенням енергії, для кожного матеріалу має бути визначений критичний розмір тріщини. Якщо розмір тріщини менший за критичний, то без додаткового збільшення зовнішнього напруження σ вона розвиватися не буде.

Таким чином, руйнування матеріалу завжди включає дві стадії:

- зародження тріщини та її зростання до критичного розміру;
- розвиток тріщини та руйнування матеріалу.

Розрізняють в'язкі й крихкі злами. В'язкому зламу передують значна пластична деформація. Крихке руйнування відбувається дуже швидко і майже без пластичної деформації.

Крихкий злам – це поверхня руйнування, що утворюється внаслідок сколу. На ній видно плоскі ділянки – фасетки сколу. Він виникає без макропластичної деформації, проте в зоні біля поверхні руйнування може зберігатися локальна деформація.

Абсолютно крихкі злами властиві лише деяким неметалевим матеріалам (скло, гіпс, мармур при низьких температурах). Метали майже завжди руйнуються з певною пластичною деформацією.

Матеріали, що руйнуються крихким механізмом, зазвичай мають:

- високу твердість (щільна кристалічна решітка, сильні міжатомні зв'язки),
- дефекти структури (межі зерен, фази впровадження).

Розвиток крихкої тріщини вимагає в 10–100 разів менше енергії, ніж в'язкої.

Ознаками крихкого зламу є

- ручьїстість – система ліній від руху тріщини вздовж напрямків стоку дислокацій.

– шиферність – лінії при переході тріщини в сусідню площину ковзання (особливо при двійникуванні).

– нормальні тріщини – виникають біля концентраторів напружень на межах зерен чи фаз впровадження.

Також наявні інші типи зламів - напівкрихкі – мають невелику макропластичність (звуження ~5% для гладких та ~2% для надрізаних зразків) та змішані – поєднання ділянок крихкого та в'язкого руйнування.

Зони крихкого зламу (рисунок 3.4):

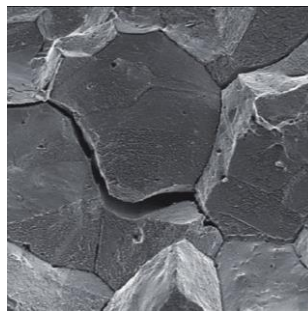
- фокус – місце зародження тріщини (зазвичай на поверхні). Може бути кілька.

- перша зона – початковий повільний розвиток тріщини; гладка поверхня, іноді зі «дзеркальним» блиском.

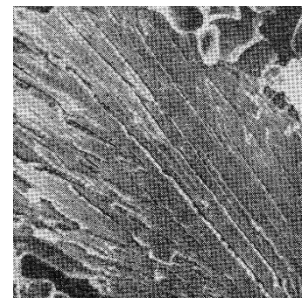
- друга зона (долон) – лавиноподібне поширення тріщини з великою швидкістю; поверхня стає шорсткішою через дефекти й нові осередки руйнування.



а-РЕМ,х1200



б-РЕМ,х1000



в-РЕМ,х300

а- фасетки скла, в- фасетки міжзеренні, г-руч'ястий узор

Рисунок 3.4 - Крихкий злам:

Квазікрихкий злам – поверхня руйнування з плоскими фасетками квазісколу, що мають меншу площу та розвинений мікрорельєф (рисунок 3.5).

При в'язкому сколі (відповідає квазікрихкому руйнуванню) злам складається з чергування фасеток крихкого руйнування зі слідами локальної пластичної деформації на їхніх межах.

Залежно від характеру поширення магістральної тріщини розрізняють такі механізми руйнування матеріалу:

- транскристалітне руйнування (руйнування без прив'язки до меж зерен та інших двовимірних дефектів) (рисунок 3.4, а);
- інтеркристалітне (або міжкристалітне) руйнування по межах зерен і субзерен (рисунок 3.4, б).

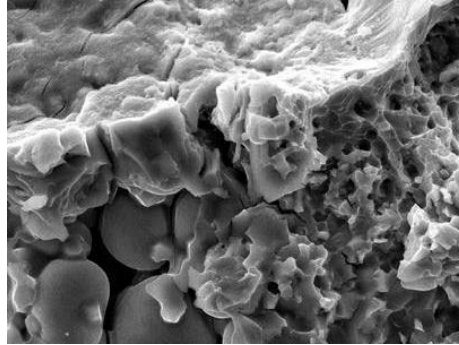


Рисунок 3.5 – Квазікрихкий злам

Оскільки межі зерен є дефектами кристалічної будови, транскристалітне руйнування характеризується більшою роботою розвитку тріщини, ніж інтеркристалітне.

Як правило, інтеркристалітне руйнування має меншу енергоємність, тобто гірший комплекс механічних властивостей порівняно з транскристалітним.

В'язкий злам утворюється шляхом злиття мікропорожнин, при цьому на поверхні виникають ямки та гребені (рис. 3.6).

Пластичні (в'язкі) злами металів (міді, алюмінію, свинцю тощо) зазвичай протиставляють крихким. Характерні особливості поверхні пластичних зламів визначаються тим, що вони виникають при макроскопічній пластичній деформації значної величини, яка відбувається у досить великому об'ємі матеріалу до та в процесі руйнування.

Сталеві вироби з волокнистою будовою зламу, як правило, мають високе значення ударної в'язкості, що зазвичай свідчить про відсутність дефектів термічної обробки.

Виникнення пластичного зламу означає, що матеріал до руйнування витримав навантаження, співмірне з межею міцності (так званою розрахунковою навантаженням). Тому «передчасного» руйнування, небезпечного при крихких зламах, не відбувається.

Причинами пластичних зламів в експлуатації зазвичай є значні

перевантаження, що виникають або через різке порушення нормальних умов роботи конструкції (наприклад, вторинні руйнування при перевантаженнях після виходу з ладу окремих елементів), або через помилки під час розрахунку на міцність.

При в'язкому руйнуванні внаслідок накопичення дефектів в усті тріщини міцність підвищується, і матеріал деформується. Ступінь деформації в цій зоні зменшується в міру поширення тріщини [8-9].

Для в'язкого руйнування характерне формування двох зон:

- зона в'язкого сколу (зламу),
- зона долому.

Область зламу, що утворюється біля зародження тріщини, розташована над фасеткою руйнування. Глибина фасеток визначає величину пластичної деформації матеріалу під час розвитку магістральної тріщини.

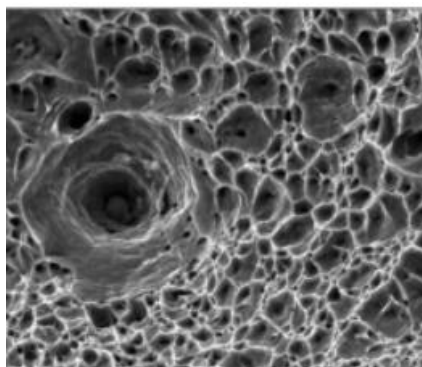


Рисунок 3.6 – В'язкий злам

3.3. Порядок проведення роботи

3.3.1. Провести макроскопічне спостереження зразків із в'язким і крихким зломом.

3.3.2. За мікрофотографіями розглянути характерні ознаки:

в'язкий злам – ямки та гребені;

крихкий злам – фасетки сколу, рубці, «дзеркальні» ділянки.

3.3.3. Порівняти особливості мікроструктури різних типів зламів за фотоматеріалами.

3.3.4. Виконати ескізи або прикріпити фотографії поверхонь зламів, відмітити характерні ділянки.

3.3.5. Результати спостережень. Користуючись таблицею 3.1, занести короткі описи поверхонь зламів в таблицю 3.2 і зробити висновки про властивості зруйнованого матеріалу та ймовірні причини його руйнування.

Таблиця 3.1 - Порівняльна характеристика в'язких та крихких зламів

Ознака	В'язкий злам	Крихкий злам
Попередня деформація	Значна пластична деформація (шийка, видовження)	Майже відсутня
Поверхня зламу	Матова, волокниста, з ямками і гребенями	Блискуча, зерниста, з фасетками сколу
Мікроструктура	Ямковий рельєф, мікропорожнини, сліди пластичної течії	Плоскі фасетки сколу, транскристалітні або інтеркристалітні тріщини
Швидкість руйнування	Поступове, відносно повільне	Дуже швидке, лавиноподібне
Поглинання енергії	Високе, потребує значних затрат енергії	Низьке, енергія витрачається мінімально
Типові умови виникнення	Висока температура, низька швидкість навантаження, пластичні матеріали	Низька температура, висока швидкість навантаження, крихкі матеріали
Характерний вигляд	«Чашечно-конусний» злам	Дзеркальні зони, промені від фокуса руйнування
Приклади	Алюмінієві сплави, м'які сталі	Скло, чавун, високовуглецеві сталі при низьких температурах

Таблиця 3.2 - Характеристика зламів

№	Зовнішній вигляд	Мікрорельєф	Деформація матеріалу	Швидкість поширення тріщини	Ударна	Відсоток	Умови виникнення

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №4

ЗЛАМИ ТРИВАЛОГО СТАТИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ. УТОМНІ ЗЛАМИ, ЇХ ОСНОВНІ ТИПИ ТА ОСОБЛИВОСТІ БУДОВИ

4.1. Мета роботи

Ознайомитись із особливостями будови зламів, що виникають при тривалому статичному навантаженні. Вивчити характерні ознаки утомних зламів. Навчитись визначати та описувати різні типи зламів за мікрофотографіями.

4.1. Теоретичні відомості

Частина 1. Злами тривалого статичного навантаження

Злами уповільненого руйнування при нормальній температурі

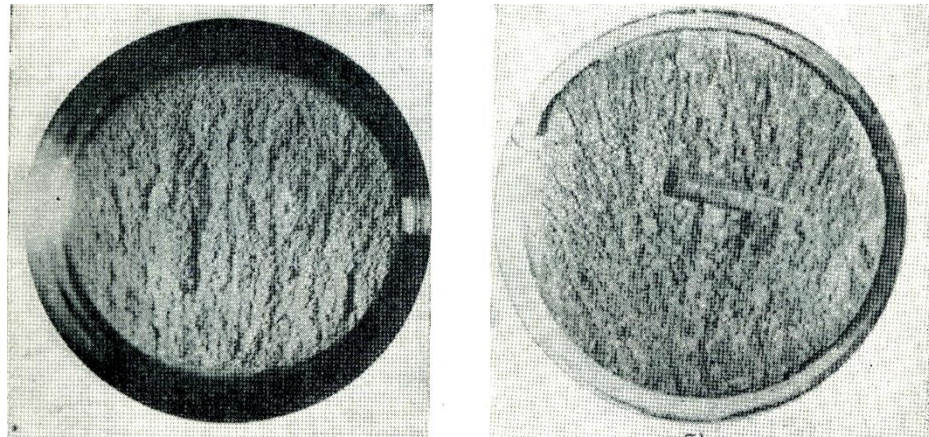
Руйнування, яке настає через значний проміжок часу після дії навантаження, менший за час розвитку пружної деформації, у замкненій напруженій системі (без додаткового зовнішнього навантаження), називають уповільненим руйнуванням [9]. Воно характерне для неметалевих матеріалів (органічне скло, пластмаси) та для ряду сталей (пружинних, підшипникових) після загартування і низького відпуску.

Основні особливості уповільненого руйнування:

1. Навантаження, яке його викликає, є нижчим за навантаження при короткочасному руйнуванні.
2. Злам має макрорухкий характер:
 - поверхня зламу перпендикулярна напрямку максимальних розтягувальних напружень;
 - проявляється кристалічна будова та рубці, що розходяться від зони зародження тріщини;
 - поблизу початку руйнування рубці дрібніші, далі – грубіші.

На зламах часто спостерігають межу між зоною повільного поширення тріщини та зоною швидкого руйнування. Наприклад, під час випробувань сталі 30ХГСА після ізотермічного загартування (твердість 35–37 НRC) видно дві зони (рисунок 4.1):

- початкова – волокниста,
- кінцева – більш типова для хрупкого руйнування.



а

б

а – зразка, б – болта

Рисунок 4.1 - Злам при тривалому навантаженні зі перекосом при кімнатній температурі сталі 30ХГСА після ізотермічного загартування, НRC = 35...37

Подібні злами трапляються у болтах під час експлуатації, а також у скляних пластинах і вітках пружин під тривалим навантаженням. У пружинах злам іде під кутом $\sim 45^\circ$ до осі витка.

Можливе й уповільнене руйнування при довготривалому стисканні — у цьому разі тріщина проходить перпендикулярно до максимальних поперечних деформацій.

Злами від тривалого статичного навантаження при підвищених температурах

Характерною особливістю виникнення таких зламів є нижчий рівень напружень (порівняно з короткочасним руйнуванням) і, як наслідок, більш повільний розвиток руйнування [9].

Злами від тривалого статичного навантаження при високих температурах зазвичай малопластичні. Тому риси, властиві крихким зламам при однократному навантаженні за нормальної температури, характерні й для цього виду руйнування.

Поняття «підвищені температури» різне для різних матеріалів і залежить від їх температури плавлення. Для низькоплавких металів (олово, свинець тощо) навіть кімнатна температура може вважатися підвищеною. Тому коректніше порівнювати матеріали за так званими гомологічними температурами – відношенням температури випробувань до абсолютної температури плавлення.

Злами при високих температурах зазвичай мають грубозернисту поверхню з великими нерівностями та міжзернистий характер руйнування (рисунок 4.2).

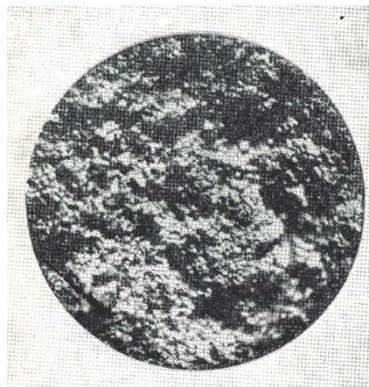


Рисунок 4.2 - Злам при тривалому навантаженні за температури 800 °С жароміцного сплаву на нікелевій основі ($\sigma = 20 \text{ кг/мм}^2$, $\tau = 13 \text{ год}$)

Проте можливі й більш волокнисті злами – це залежить від температури та тривалості навантаження. Ступінь «волокнистості» визначається кількістю зерен, що руйнуються всередині своїх об'ємів.

Частина 2. Втомні злами

В авіації, на залізничному та автомобільному транспорті й в інших галузях техніки **втомні злами** є найпоширенішим видом руйнування деталей. Тому вміння правильно їх аналізувати має вирішальне значення для встановлення причин поломок.

Втомні злами виникають після **багаторазового навантаження** при напруженнях, які зазвичай не перевищують межу плинності матеріалу. Тому на ділянці розвитку втомної тріщини **відсутні сліди макропластичної деформації**.

Перед появою помітної тріщини виникають мікрозсуви та зародкові мікротріщини, частина з яких об'єднується у **магістральну втомну тріщину**. У її зоні спостерігаються мікропластичні деформації, тому макроскопічно злам виглядає крихким, а мікроскопічно – пластичним.

У процесі розвитку тріщини поперечний переріз деталі послаблюється, і настає стадія **остаточного долому** з високою швидкістю.

Структура втомних зламів залежить від трьох факторів:

- умов навантаження (частота, амплітуда);
- опору деталі (форма, властивості матеріалу, стан поверхні);
- впливу середовища (температура, корозія).

Термін *«втомний злам»* охоплює кілька груп (таблиця 4.1):

- типові втомні злами;
- повторно-статичні та повторно-ударні;
- ударно-втомні;
- корозійно-втомні;
- термовтомні;
- втомні злами при підвищених температурах.

Окремо виділяють **поверхневі втомні руйнування**, що виникають при багаторазових контактних навантаженнях. Вони виглядають як комбінація дрібних сколів і серії мікрозламів.

Типові втомні злами виникають без впливу корозії чи температури при частотах від сотень до десятків тисяч циклів на хвилину. Кількість циклів до руйнування перевищує сотні тисяч. Це найпоширеніший вид втомних руйнувань.

Повторно-статичні злами Формуються після відносно невеликої кількості навантажень (до 10 000), з частотою не більше кількох десятків циклів на хвилину. Вони займають проміжне місце між типовими втомними та статичними зламами.

Такі злами зустрічаються, наприклад, у деталях шасі літаків, які зазнають повторних перевантажень під час посадки. Характеризуються слідами пластичної деформації, особливо на стадії остаточного руйнування. На поверхні можуть з'являтися радіальні промені, подібні до тих, що виникають при статичному крихкому зламі, але зазвичай спостерігаються й ознаки типового втомного руйнування: дві зони (розвитку тріщини та долому) та втомні лінії (рис. 4.3).

Таблиця 4.1 - Основні типи втомних зламів

Тип втомного зламу	Суть процесу	Приклади деталей	Особливі ознаки
Типові	Руйнування після багатьох циклів навантаження без істотного впливу корозії чи температури	Вали, ресори, шестерні	Дві зони: розвиток тріщини та долому; втомні лінії
Повторно-статичні	Виникають після відносно невеликої кількості циклів (до 10 тис.) при статичних або повільних навантаженнях	Шасі літаків, деталі з дюралюмінію	Сліди пластичної деформації, іноді радіальні «промені»
Ударно-втомні	Руйнування від багаторазових ударних навантажень	Стволи вогнепальної зброї, клапани двигунів	Схожі на типові втомні, але зумовлені ударами
Корозійно-втомні	Дія циклічних навантажень + корозійного середовища	Суднові конструкції, деталі мостів, труби	Тріщини в різних напрямках, поверхня сильно пошкоджена корозією, сітка тріщин
Термічні	Внаслідок циклічних нагрівів і охолоджень	Артилерійські стволи, штампи, бандажі коліс	Тріщини від температурних напружень; часто в місцях охолодження
Високотемпературні	Руйнування при тривалих навантаженнях за підвищених температур	Деталі реактивних двигунів, атомних реакторів	Кільця-«райдуги» росту тріщин, чіткий фокус і зони розвитку
Контактні	Викришування поверхні при багаторазових контактних навантаженнях	Підшипники, зуби шестерень, рейки, бандажі	Піттинг на відстаючій поверхні при перекочуванні

Характерна особливість повторно-статичних (як і типових втомних) зламів – наявність відкладень на поверхні, що утворюються внаслідок руйнування мікрооб'ємів матеріалу та окиснення дрібних частинок. Для типових втомних зламів після видалення цих відкладень (наприклад, гумкою) структура зламу стає чіткішою. Для повторно-статичних зламів навпаки – після очищення характерний малюнок зникає, і межа між зонами втомного розвитку та долому часто стає нечіткою.

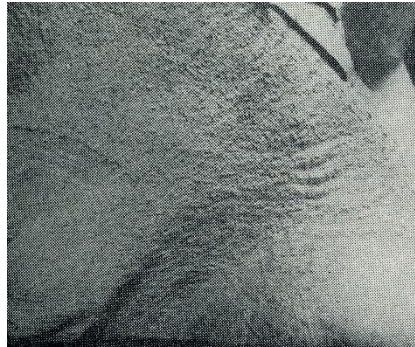


Рисунок 4.3 - Поверхня повторно-статичних зламів деталей з дюралюмінію марки Д1 з втомними лініями [8]

Ударно-втомні злами виникають від багаторазового ударного навантаження (наприклад, у деталях вогнепальної зброї, клапанних механізмах двигунів). За будовою майже не відрізняються від типових втомних, але виділяються в окрему групу для підкреслення специфічних умов їх утворення.

Корозійно-втомні злами формуються під дією змінних навантажень у поєднанні з агресивним середовищем. Їхні тріщини поширюються хаотично (на відміну від звичайних втомних) і подібні до тріщин, викликаних лише корозією. Найбільшу небезпеку становить сумарний ефект навантаження та корозії, який значно сильніший за їх окремий вплив. Це зумовлено тим, що продукти корозії накопичуються в тріщинах, розширюють їх і прискорюють руйнування.

Процес відбувається поетапно: спочатку з'являються вогнища корозії, потім від них розвиваються тріщини, які згодом заповнюються продуктами корозії. Біля зламу зазвичай помітна сітка корозійно-втомних тріщин (рисунок 4.4). Поверхня такого зламу сильно пошкоджена корозією і густо порізана тріщинами, що різко відрізняє його від типового втомного.

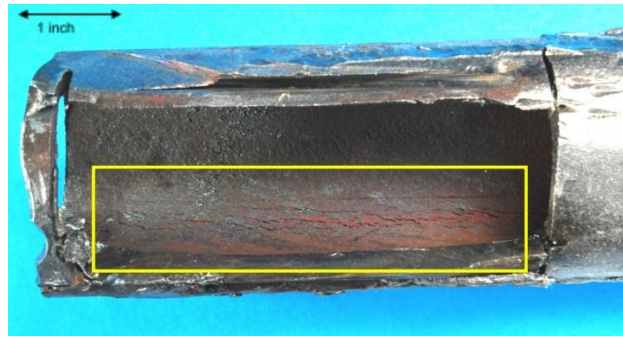


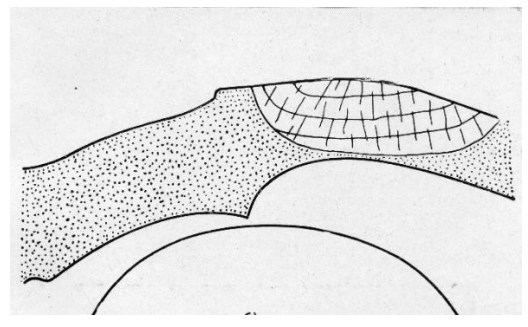
Рисунок 4.4 – Корозійно-втомний злам

Злами термічної втоми виникають під дією циклічних температурних напружень унаслідок багаторазових нагрівань та охолоджень. Приклади: розтріскування водоохолоджуваних штамів для гарячого штампування, бандажів коліс вагонів через нагрівання при гальмуванні. Сьогодні термічну втому активно вивчають для деталей реактивних двигунів та атомних реакторів.

Злами втоми при підвищених температурах за кольоровими (іноді райдужними) кільцевими смугами росту тріщин подібні до термічної втоми, але відрізняються чіткішим виділенням фокусу та зон руйнування.



а



б

Рисунок 4.5 - Поверхня (а) та схема (б) зламу головки циліндра поршневого двигуна з литого алюмінієвого сплаву Al5 внаслідок втоми при підвищеній температурі.

Тріщини з'явилися за 30 год роботи двигуна. В експлуатації подібні руйнування виникали через 1000–2000 годин, що відповідало приблизно 1000–5000 циклам зміни температур, тоді як у випробуванні їх було лише 30.

Контактна втома (піттинг, шелушіння, "осповий" знос) Це руйнування поверхні деталей, що перебувають у контакті при значних відносних переміщеннях: підшипники кочення й ковзання, зуби зубчастих коліс, поверхні катання бандажів і рейок тощо.

Викришування матеріалу виникає у зонах, де напрям сили тертя протилежний напрямку переміщення точки контакту. Наприклад, при перекочуванні двох циліндричних поверхонь піттинг з'являється лише на відстаючій, але не на випереджувальній поверхні.

Контактне втомне руйнування, яке також називають піттингом, шелушінням або «осповим» зносом, полягає у викришуванні матеріалу з поверхні деталей, що контактують і мають значні взаємні переміщення (підшипники кочення й ковзання, зуби зубчастих коліс, поверхні катання бандажів та головок рейок тощо).

Викришування виникає там, де напрям сили тертя протилежний напрямку переміщення точки контакту. Таким чином, при ковзанні двох циліндричних поверхонь, що перекочуються одна по одній, піттинг з'являється тільки на відстаючій, але не на випереджувальній поверхні.

Особливості будови втомних зламів найзручніше вивчати на типових прикладах, оскільки вони мають найвиразніші ознаки. Це доцільно ще й тому, що характерні риси таких зламів можна спостерігати й у деталях інших груп, хоча й менш чітко. Найвиразніші ознаки мають злами сталевих деталей після комбінованого навантаження, наприклад, у колінчастих валах при одночасній дії вигину й кручення [9].

Втомний злам зазвичай включає:

- осередок руйнування,
- зону поступового розвитку (власне втомного),
- зону остаточного долому.

Структура зламу складається з п'яти основних елементів (рисунок 4.6):

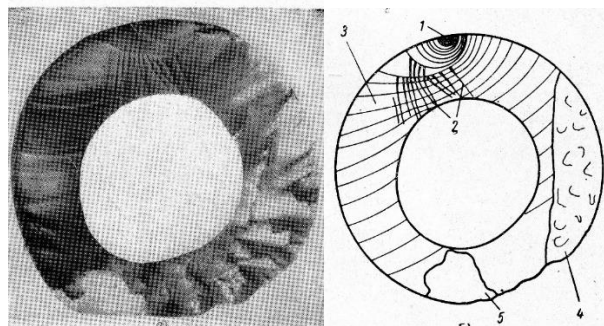
1. Фокус зламу — мікроскопічне місце зародження тріщини.
2. Осередок руйнування — макроскопічне місце, утворене злиттям кількох фокусів.
3. Ділянка вибіркового розвитку, що займає майже всю поверхню зони втомного росту.

4. Ділянка прискороного розвитку, яка формується перед остаточним руйнуванням.

5. Зона долому — завершальна частина руйнування.

Крім того, на поверхні зламу можуть бути:

- ступінки й рубці від злиття зародкових тріщин;
- втомні лінії, що відображають зміну напружень;
- пасинкові тріщини при різкій зміні напрямку розвитку;
- вторинні ступінки й рубці від злиття пасинкових тріщин;
- ділянки крихкого прослизання від одноразового перевантаження.



1 – фокус зламу й зона осередку руйнування; 2 – вторинні ступінки та рубці;
3 – втомні лінії; 4 – зона прискороного розвитку зламу; 5 – зона долому

Рисунок 4.6. Втомний злам (а) та його схема (б) шатунної шийки колінчастого вала зі сталі 40ХНМА з типовими ознаками

Будова втомних зламів має кілька характерних особливостей. У самому осередку руйнування розташовуються ступінки та рубці. У зоні вибіркового розвитку можна побачити втомні лінії, пасинкові тріщини, а також вторинні ступінки й рубці. Ділянки крихкого прослизання зазвичай виникають у перехідній або в зоні прискороного розвитку. Важливою ознакою є наявність межі, яка відділяє зону поступового розвитку від зони долому. Її часто називають демаркаційною межею. Також для втомних зламів характерна зміна шорсткості поверхні, що залежить від ступеня перевантаження деталі.

Фокус зламу — це дуже мала ділянка, де зароджується тріщина. Він точніше за осередок руйнування вказує місце початку руйнування. Якщо два сусідні фокуси дають тріщини, які зливаються, то утворюються характерні складки або ступінки. Фокус формується на ранній стадії, коли виникають

субмікроскопічні тріщини, або надриви, які неможливо виявити під час звичайних випробувань. Найчастіше тріщини починаються на поверхні деталі, адже ці ділянки зазнають найбільших навантажень та пошкоджень. Рідше вони виникають під поверхнею, якщо є внутрішні дефекти чи достатньо глибокий зміцнений шар.

Осередок руйнування — це вже макроскопічна зона початку втомної тріщини. Він може бути виявлений при технічному огляді або під час ремонту механізмів. Поверхня осередку зазвичай має сильний блиск і дрібнозернисту структуру. Це пояснюється тертям від багаторазового відкривання й закривання тріщини. В осередку часто формуються радіально розходящіся складки та рубці, від яких, як від центру, відходять втомні лінії. Проте у вузькій зоні самого осередку ці лінії зазвичай непомітні.

Вивчення поверхонь зламів показує, що водночас може виникати кілька фокусів. У такому разі тріщини з'являються у вигляді серії дрібних надривів, які здебільшого розташовуються паралельно одна одній, інколи перекриваються або навіть утворюють сітку тонких початкових тріщин (рисунок 4.7).

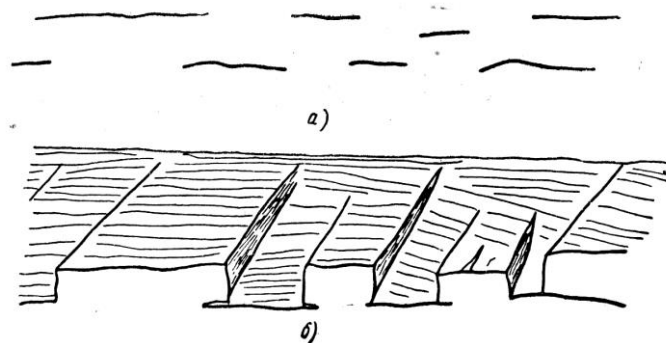


Рисунок 4.7 – Схема утворення ступінок і рубців: початкові надриви (а) та злам із рубцями й ступінками (б)

Якщо початкові тріщини виникають майже в одній площині, то на місці їх злиття з'являється лише невеликий рубець. Якщо ж вони розташовані на значній відстані одна від одної, то утворюються більші уступи або навіть відділяються своєрідні «голки» та «пелюстки».

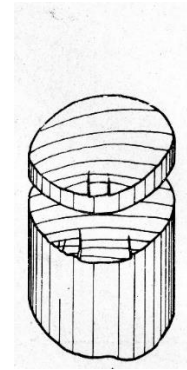
Кількість ступінок і рубців, що виникають при злитті початкових тріщин, відображає кількість фокусів та побічно вказує на величину перевантаження. Чим воно більше, тим численнішими будуть ступінки й рубці. Водночас поява

багатьох фокусів може бути пов'язана не лише з перевантаженням, а й із наявністю концентраторів напружень: корозійних раковин, слідів грубої механічної обробки тощо. Висота уступів залежить від форми й положення концентраторів. Наприклад, при довгому надрізі з дуже малим радіусом закруглення, розташованому перпендикулярно до поля головних нормальних напружень, рубці можуть бути зовсім відсутні або ледве помітні. Так само відсутність ступінок можлива при розвитку руйнування від одного точкового концентратора.

Форма та розміри ступінок і рубців залежать від ступеня перевантаження: при сильному перевантаженні осередки зароджуються на більшій відстані один від одного, що дає великі ступінки; при меншому перевантаженні зона початку руйнування вузла, ступінки дрібні, а поверхня більш гладка. Якщо початкові тріщини віддалені настільки, що не взаємодіють між собою, то руйнування може відбуватися одразу по кількох площинах (рисунок 4.8).



а



б

Рисунок 4.8 - Злам (а) та схема зламу (б) болта зі сталі 45, що утворився по двох перерізах

Коли поряд виникає кілька осередків руйнування, тріщина, розвиваючись по найвигіднішій площині, може згладжувати вже наявні ступінки від злиття осередків.

Послідовність появи осередків визначають за густотою втомних ліній та блиском поверхні навколо них. Чим густіше розташовані лінії і чим більший блиск, тим повільніше розвивалася тріщина і тим раніше вона виникла.

У зоні вибіркового розвитку втомні тріщини можуть кілька разів змінювати напрям. Це призводить до появи пасинкових тріщин, нових втомних ліній та

вторинних ознак. Причиною зміни напрямку можуть бути нові умови навантаження, перерозподіл напружень у міру зростання тріщини або вплив сусідніх дефектів і залишкових напружень. Пасынкові тріщини розвиваються в новому напрямку, а при їхньому злитті утворюються вторинні ступінки й рубці. Усе це характерно для меж ділянки вибіркового розвитку зламу.

4.3. Порядок проведення роботи

4.3.1. Провести макроскопічне спостереження зламів зразків (злами тривалого статичного навантаження та утомні злами).

4.3.2. Розглянути мікрофотографії утомних і статичних зламів.

4.3.3. Визначити характерні ознаки:

- для статичних зламів – ямки, гребені, мікропорожнини;
- для утомних – концентричні дуги росту тріщини, зона долому.

4.3.4. Зробити ескізи або вставити мікрофотографії, підписати характерні ділянки.

4.3.5. Заповнити таблицю з описом.

Таблиця 4.2 – Характеристика зламів

№ зразка	Тип зламу (статичний/ утомний)	Ознаки на макроскопічному зображенні	Ознаки на мікрофотографії	Відсоток крихкої та в'язкої складової (%)
1				
2				
3				

ЛІТЕРАТУРА

1. Методи та засоби мікроскопії — монографія / Антонюк В. С., Тимчик Г. С., Петльований П. В., Білокін С. О., Бондаренко М. О., Бондаренко Ю. Ю. (Київ, НТТУ КПІ, 2013) — 333 с.
2. Мудрий С. І., Кулик Ю. О., Якимович А. С. Рентгеноструктурний аналіз у матеріалознавстві: Навч.-метод. пос. [для вищ. навч. закл.]. — Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2017. — 226 с.
3. Механічні властивості та конструкційна міцність матеріалів. Частина І. Основні види механічних випробувань: методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт для студентів напряму підготовки 6.050403 «Інженерне матеріалознавство» денної та заочної форм підготовки / Уклад. В.В. Холявко, Ю.М. Подрезов. - К.: КАПРІ, 2010. - 80 с
4. Погребна Н.Е., Куцова В.З., Котова Т.В. Механічна стабільність матеріалів: Навчальний посібник. — Дніпро: НметАУ, 2021. — 109 с.
5. Холявко В. В. Фізичні властивості та методи дослідження матеріалів: навчальний посібник для студентів галузі знань 13 – Механічна інженерія спеціальності 132 – Матеріалознавство денної та заочної форм навчання / В. В. Холявко, І. А. Владимирський, О. О. Жабинська. — Київ: Центр учбової літератури, 2016. — 156 с.
6. Мазур В.І., Куцова В.З., Носко О.А., Ковзель М.А. Сплави на основі заліза. Підручник у 2-х томах. Т. 1,2. Київ: «Політехніка», 2015. 272 с.
7. Леговані сталі та сплави з особливими властивостями. Підручник / Куцова В.З., Ковзель М.А., Носко О.А. — Дніпропетровськ: НМетАУ, 2008. — 348 с.
8. Куцова В.З. Експертиза матеріалів та металів / В.З.Куцова, Н.М. Федоркова. — Дн-вськ: НМетАУ, 2015, 51 с.
9. Бялік О.М., Кондратюк С.Є., Кіндрачук М.В., Черненко В.С. Структурний аналіз металів. Металографія. Фрактографія. — К.: ВПІ ВПК “Політехніка”, 2006. — 328 с. ISBN: 966-622-202-2

Навчально-методичне видання

Аюпова Тетяна Анатоліївна,
Носко Ольга Анатоліївна,
Котова Тетяна Володимирівна,
Коваль Данило Олегович

ВИБІР, ДИЗАЙН ТА ЕКСПЕРТИЗА МАТЕРІАЛІВ

Навчально-методичні рекомендації до практичних занять
для студентів спеціальності G8 – матеріалознавство
ОПП «Матеріалознавство» (магістерський рівень)

Електронне видання

Зареєстровано НМВ УДУНТ (№ 72 від 03.09.2025)

В авторській редакції
Комп'ютерна верстка Т. А. Аюпова

Формат 60x84 1/16. Ум. друк арк. 2,44. Облік.-вид. арк. 2,47.
Зам. № 106.

Видавець: Українській державний університет науки і технологій
вул. Лазаряна, 2, ауд. 2216, м. Дніпро, 49010

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 7709 від 14.12.2022

Адрес видавця та дільниці оперативної поліграфії:
вул. Лазаряна, 2, Дніпро, 49010