

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет  
Інститут машинобудування та транспорту  
Кафедра технології підвищення зносостійкості

Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи

**«МАКРОСКОПІЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕРХНІ ЗЛОМІВ  
ДЕТАЛЕЙ МАШИН»**

з дисципліни «Технологія зміцнення поверхонь»

для студентів напряму підготовки 6.050504 – Зварювання  
всіх форм навчання

Укладачі: доцент кафедри ТПЗ Т.Ф. Архіпова

Вінниця  
ВНТУ  
2014

Рекомендовано до використання в навчальному процесі  
Методичною радою Вінницького національного технічного університету  
Міністерства освіти і науки України (протокол № \_\_ від \_\_\_\_\_ 201\_\_ р.)

Рецензенти:

**В. А. Огородніков**, доктор технічних наук, професор

**І. О. Сивак**, доктор технічних наук, професор

Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи  
«Макроскопічне дослідження поверхні зломів деталей машин» з  
дисципліни «Технологія зміцнення поверхонь» для студентів напряму  
підготовки 6.050504 – Зварювання / Уклад. Т.Ф. Архіпова. – Вінниця:  
ВНТУ, 2014. – 25 с.

# ЛАБОРАТОРНА РОБОТА

Тема роботи:

## «МАКРОСКОПІЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕРХНІ ЗЛОМІВ ДЕТАЛЕЙ МАШИН»

### 1. МЕТА РОБОТИ

Набути практичних навичок у дослідженні причин втрати працездатності зруйнованих деталей машин методом макроскопічного та фактографічного аналізу.

### 2. ОБЛАДНАННЯ І МАТЕРІАЛИ

1. Зразки зруйнованих зразків і деталей машин.
2. Оптичні пристрої для дослідження зломів:
  - МБС-2,
  - лупи з 5-кратним та 30-кратним збільшенням,
  - цифровий фотоапарат Canon).
3. Розчинники, травники, бензин, розчини кислот та луг ( $\text{HNO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NaOH}$ ).
4. Плакати, фрагменти фільмів.

### 3. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

#### 3.1. Поняття та завдання фрактографії

Завдання підвищення експлуатаційної надійності і довговічності деталей машин і механізмів неможливо вирішити без ефективної системи технічної діагностики причин руйнування. Розвиток і впровадження технічної діагностики як способу управління якістю сприяє зменшенню витрат металопрокату, зниженню витрат на ремонт і простій діючого парку машин. Діагностування характеру пошкоджуваності і руйнування деталей вимагає наявності інформації про зміну виду зломів конструкційних матеріалів залежно від напруженого стану і різноманітних способів навантаження. Спосіб діагностики базується на вивченні кінетики і впливу на нього механізму руйнування, а також природи різного роду дефектів матеріалу.

**Фрактографія** (fractus – злом) – вивчає будову зломів, тобто поверхню зразка або деталі, що утворилася при їх руйнуванні (розділенні на частини) в результаті експлуатації або випробування.

Вивченням будови поверхні зломів людство займається вже багато століть для оцінки якості металу, і це вважалося секретом при виготовленні зброї, злитків міді і предметів мистецтва. Перша класифікація зломів поверхні була проведена і опублікована в 1722 р. Реомюром у вигляді гравюр. З розвитком металургії і засобів аналізу структури сталі, вирішенням нових технічних задач підвищення несучої здатності металу посилювався інтерес до фрактографії.

Катастрофічні руйнування різних конструкцій стали поштовхом у розвитку наукового підходу до проблеми міцності металічних конструкцій. Виникла теорія Гріфітса, що пояснює механізм крихкого руйнування, і теорія дислокації Фріделя, яка дозволяла пояснити причину надзвичайно сильної розбіжності між величинами теоретичної міцності кристалічних ґрат металів і реальною міцністю полікристалічних металів і сплавів.

Дослідження закономірностей руйнування із застосуванням методів фрактографії дозволяють сьогодні об'єднати зусилля фізики і механіки руйнування для створення фізичної теорії руйнування металічних конструкцій, що відповідає сучасним вимогам до конструкційної міцності. На основі отриманих залежностей будують діаграми механічного стану металу, що дозволяють залежно від виду напруженого стану і структури сталі визначити можливий характер руйнування, що у результаті підвищує надійність роботи конструкції в цілому.

**Фрактографія дозволяє вирішувати два завдання.**

**Перше** – ідентифікація різновидів руйнування з урахуванням виду навантаження (статичне, повторно-статичне, динамічне, втоми, кручення, згин). Для цього досліджується макробудова злому, яка відображає характер напруження, що діє, ступінь перевантаження, розташування і характер осередку руйнування, постійність або зміну кінетики і фронту розвитку тріщини, вплив залишкового напруження і зовнішнього середовища. Розташування осередку руйнування дозволяє судити про ступінь впливу конструктивних, технологічних і структурних концентраторів напруження, а також дефектів металу.

**Друге** – виявлення механізму розвитку тріщини, глибинні причини дії різних чинників, зокрема умов навантаження і властивостей матеріалу на процес руйнування. У цьому випадку досліджується мікробудова поверхні злому.

Методи дослідження виду зломів на макро- і мікрорівнях доповнюють один одного, а при вирішенні конкретних завдань один із них стає визначальним.

Вид злому є критерієм оцінки якості металу. Існує зручний для практики, але дуже умовний поділ зломів на **крихкий** і **в'язкий**. Основною ознакою такого поділу є ступінь макропластичної деформації, що супроводжує руйнування. Зломи класифікують також за ознаками, що враховують мікромеханізм руйнування, характер силової дії; за морфологією поверхні руйнування, за зв'язком з елементами структури та ін. Класифікація поверхні зломів за основними ознаками наведена на рис. 1.

Для опису мікробудови зломів використовують такі поняття:

**Фасетки** – елементи поверхні руйнування, що мають слабо розвинений мікрорельєф, чіткі межі і один напрям руйнування (рис. 2 а).

**Сходінка** – елемент поверхні крихкого або квазікрихкого руйнування, що утворюється при з'єднанні двох поверхонь руйнування, що розташовані на різних рівнях, або в результаті відколу вздовж межі мікродвійників.

Спостерігається при внутрішньозеренному крихкому руйнуванні (рис. 2, б).

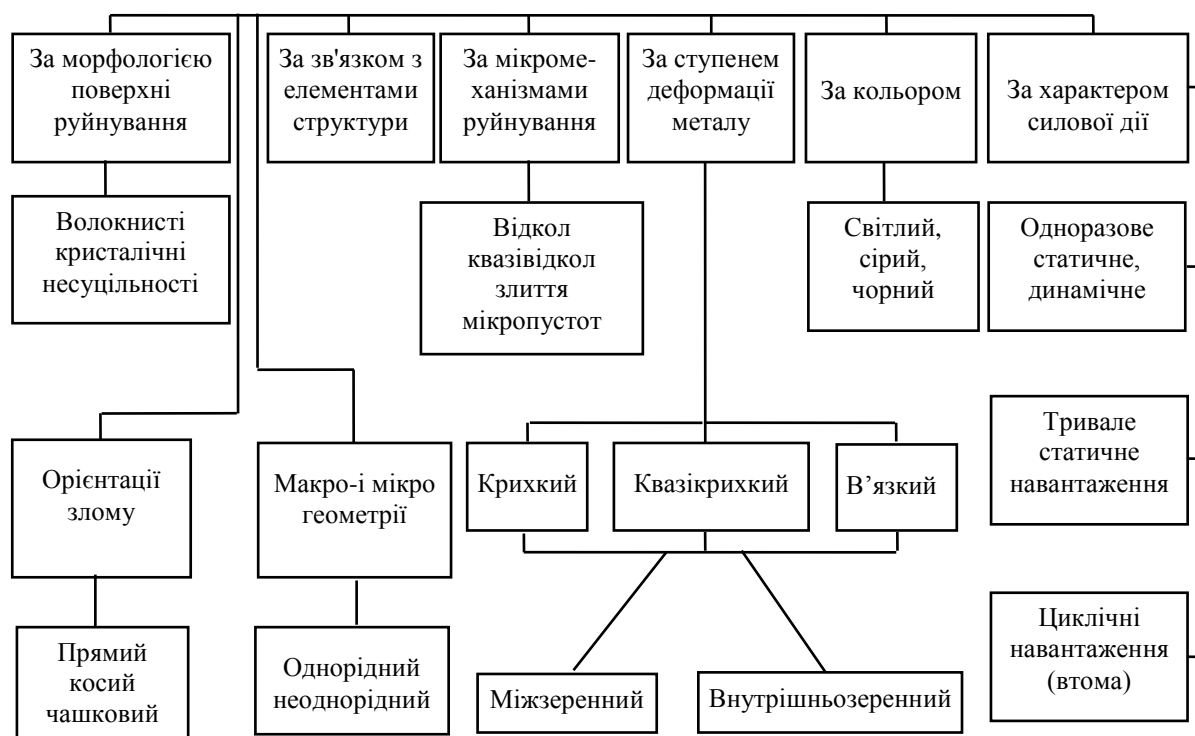


Рисунок 1 – Класифікація зломів за основними ознаками

**Відкол** – механізм крихкого руйнування: розділення металу по площинах, що збігається з кристалографічними площинами зерен (внутрішньозеренний відкол) або плоскими ділянками між зернами (міжзеренний відкол). Характеризується поверхнею руйнування, що складається з фасеток, сумірних з розмірами зерен, і практично не має ознак пластичної деформації.

**Квазівідкол** – механізм внутрішньозеренного квазікрихкого руйнування, що характеризується розділенням металу по площинах, що не збігаються з кристалографічними площинами зерен. Характеризується поверхнею руйнування, що складається з фасеток, які мають розміри менше розмірів зерен, зі слабо вираженими ознаками локальної пластичної деформації.

**Злиття мікропустот** – механізм внутрішньозеренного або міжзеренного в'язкого руйнування, що характеризується поділом металу шляхом зародження, росту і злиття мікропор при пластичній течії металу. Характеризується поверхнею руйнування, що має ямковий мікрорельєф з різним ступенем розвитку ямок і значною пластичною деформацією всієї поверхні (рис.2 в, г).

**Рівчачковий узор** – елемент будови поверхні фасеток відколу і квазівідколу, що утворюється в результаті руйнування перемичок між фасетками, які розташовані в довколишніх кристалографічних площинах,

паралельних одна одній, і являє собою систему сходинок відколу, що зливаються. Напрямок злиття сходинок відколу в рівчаковому узорі відповідає напрямку поширення тріщини (рис. 2, *д*).

**Язички** – елементи будови поверхні фасеток відколу трикутної або трапецієподібної форми, які утворюються в результаті локального руйнування вздовж поверхні розділу матриця-двійник, спостерігаються при внутрішньозеренному крихкому або квазікрихкому руйнуванні (рис.2, *е*).

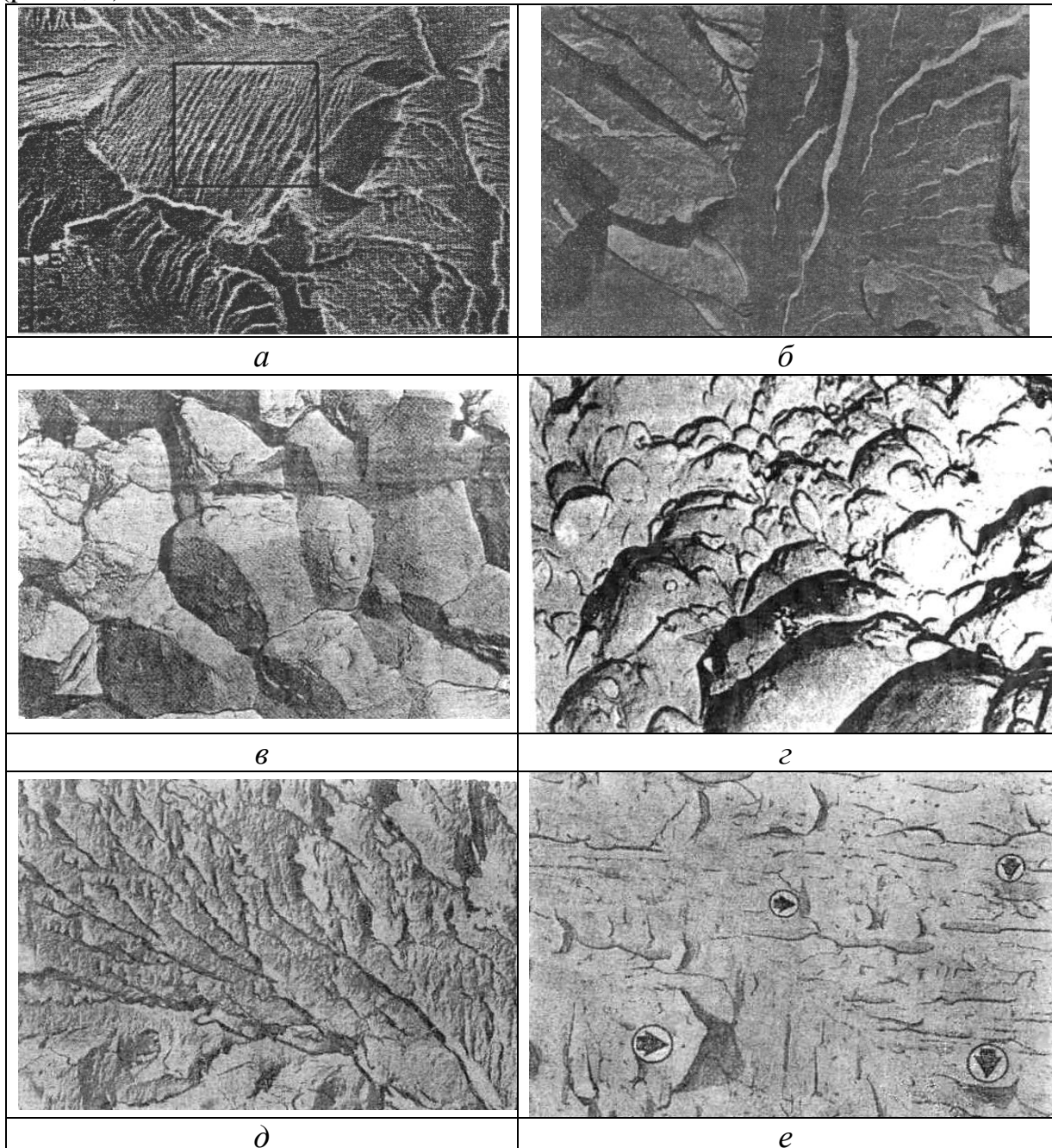


Рисунок 2 – Елементи мікробудови поверхні зломів:  
*а* – фасетки відколу з ділянкою втомних рівчаків; *б* – сходинки відколу,  
*в* – міжзеренне руйнування, *г* – внутрішньозеренне в'язке руйнування,  
*д* – рівчаковий узор, *е* – язички

**Осередок руйнування** – ділянка поверхні злому, в якому відбулося зародження тріщини (рис.3).

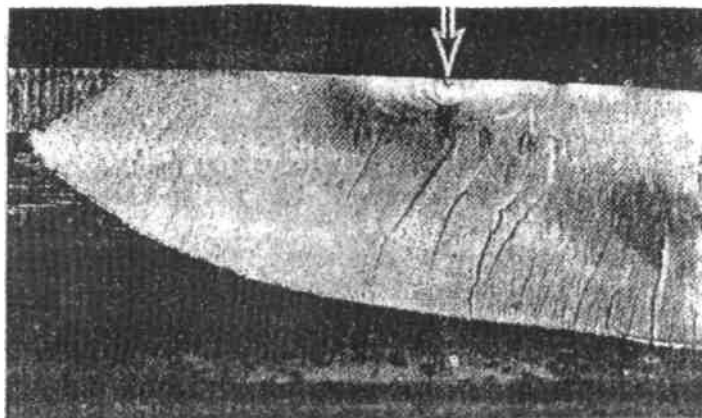


Рисунок 3 – Осередок руйнування на поверхні злому зуба шестерні

**Зона зародження тріщини** – ділянка злому, прилегла до осередку руйнування.

**Зона розвитку тріщини** – ділянка злому, що знаходиться далеко від осередку зародження тріщини.

**Зона долому** – ділянка злому, що прилягає до закінчення тріщини у поверхні зразка, протилежна осередку зародження тріщини. Розрізняють тріщини первинні, які поширюються з осередку руйнування і утворюють поверхню руйнування, і вторинні, що поширюються з окремих центрів руйнування, що розташовані на поверхні злому і є поперечними щодо площини первинного злому.

Злом певною мірою є своєрідною фотографією тих процесів, які відбувалися при руйнуванні досліджуваного об'єкта. Найчастіше для фрактографічних досліджень металів і сплавів застосовують такі методи аналізу:

- а) *макроскопічну фрактографію* – вивчення зломів неозброєним оком або при невеликому (до  $\times 50$ ) збільшенні;
- б) *мікроскопічну фрактографію* – вивчення зломів із застосуванням оптичних пристроїв (збільшення до  $\times 500$ );
- в) *електронну мікрофрактографію* – вивчення зломів за допомогою просвітлювального електронного мікроскопа (ПЕМ) методом реплік;
- г) *растрову електронну мікрофрактографію* – вивчення зломів за допомогою скануючого (РЕМ) електронного мікроскопа;
- д) *рентгеноструктурний і мікрорентгеноспектральний аналіз*;
- е) *рентгеноструктурну фрактографію*.

Метод досліджень повинен бути вибраний з урахуванням поставленого завдання і характеру об'єкта, що вивчається.

**Макрофрактографія** є обов'язковою початковою стадією будь-якого фрактографічного дослідження будови зломів і дозволяє достатньо надійно визначити:

- а) характер руйнування (крихке або в'язке, транс- або інтеркристалітне);
- б) характер дії навантажень (статичне або циклічне);
- в) схему прикладення навантажень (розтягування, стискання, кручення, згин і т.д.);
- г) деякі кількісні характеристики руйнування, наприклад, ступені волокнистого злomu, частки прямого злomu і крихкого руйнування.

Макроаналіз передбачає фотографування зломів за допомогою фотоприставок (МФН) або спеціальних оптичних приладів.

При вивченні характеру і причин експлуатаційних руйнувань очищення зразка проводиться тільки після ретельного огляду злomu в незайманому вигляді, оскільки наявність оксидів, пилу, слідів масла тощо, може дати додаткову інформацію про умови виникнення і розвитку процесу руйнування.

Макроаналіз починають з огляду поверхні руйнування неозброєним оком і поступово переходять до збільшень у 10-50 разів. Визначають ділянки, необхідні для локального фотографування. Важливим моментом дослідження є правильний вибір кута й інтенсивності освітлення злomu для отримання контрастної і об'ємної картини.

**Мікрофрактографія** ефективна при дослідженні крихких і напівкрихких зломів з наявністю великих гладких фасеток, міжзеренних і втомних зломів. Вона дозволяє виявити тонку будову гладких площин для встановлення природи руйнування: у разі міжзеренного злomu – вивчення будови і стану міжзеренних поверхонь (наявність інших фаз, прошарків, плівок тощо), у разі втомного злomu – оцінка будови втомних борозен. Мікрофрактографія дозволяє робити і кількісні оцінки, наприклад, частки злomu, зайнятого транс- або інтеркристалітними ділянками при змішаному виді руйнування як співвідношення площин, зайнятих транскристалітними фасетками, до загальної площі злomu. Додаткову інформацію дає проведення мікроструктурних досліджень матеріалу в зонах, що прилягають до поверхні руйнування.

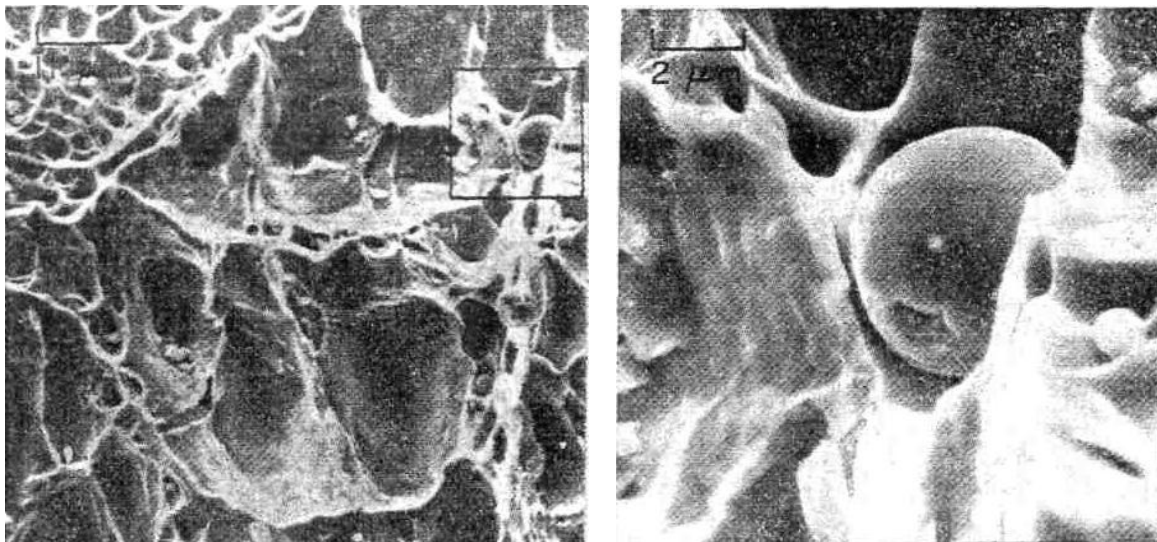
**Електронна мікрофрактографія** дозволяє вивчати закономірності процесів мікроруйнування і впливу на ці процеси мікро- і субмікроструктури. Особливо ефективно застосування електронної мікрофрактографії при аналізі природи експлуатаційних руйнувань. Вона дозволяє оцінити роль, яку відіграють в процесі руйнування розмір і форма зерен, наявність інших фаз і їх морфологія, роль внутрішнього напруження навколо дисперсних частинок, оцінити міцність внутрішніх зв'язків між матрицею і дисперсними частинками. При вивченні будови зломів використовують електронні мікроскопи двох видів – просвітлювальні і растрові. *Растровий електронний мікроскоп* (РЕМ) дозволяє безпосередньо досліджувати елементи зруйнованої поверхні до 25 мм, що



вимагає розрізати зразок або деталь на окремі частини. РЕМ дозволяє багатократне використання одного і того ж зразка для аналізу; легкість зміни збільшення в широкому діапазоні, що дозволяє досліджувати як загальну топографію злому, так і окремі елементи; можливість отримання тривимірного відображення елементів структури складного геометричного рельєфу завдяки великій глибині фокуса; регулювання контрасту зображення дозволяє отримати знімки, які легко піддаються кількісній оцінці, наприклад, для визначення частки ділянок з тим або іншим рельєфом (рис. 4). Оснащення РЕМ зондом дозволяє проводити комплексне дослідження для визначення природи структурних складових або включень на поверхні руйнування.

При *просвітлювальній електронній мікроскопії* (ПЕМ) немає можливості для безпосереднього спостереження поверхні руйнування. Дослідження проводиться за допомогою реплік, які копіюють рельєф поверхні руйнування, що вимагає попереднього перегляду злому для визначення місця дослідження. Проте ПЕМ має вищу роздільну здатність порівняно з РЕМ, що дає можливість досліджувати дрібніші елементи рельєфу і тонкої інфраструктури втомного руйнування (рис.5). При добуванні (екстрагуванні) з поверхні руйнування на репліку дисперсних частинок ПЕМ за допомогою мікродифракції дозволяє визначити атомно-кристалічну структуру частинок. Кількісний аналіз при ПЕМ утруднений, оскільки необхідно точно знати місце, звідки знята репліка.

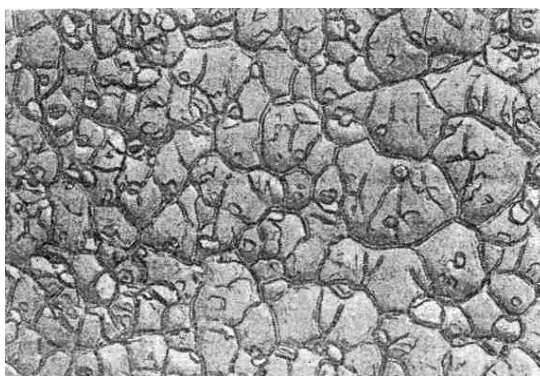
Для вирішення практичних завдань фрактографії ефективно застосування обох методів.



*a*

*б*

Рисунок 4 – Фрактограмми РЕМ поверхні руйнування з наявністю оксисульфїду: *a* –  $\times 1000$ ; *б* –  $\times 5000$



× 30000

Рисунок 5 – Фрактограма ПЕМ, що відображає вплив дисперсних включень на руйнування

**Рентгеноструктурний і мікрорентгеноспектральний аналізи** дають можливість точніше здійснити ідентифікацію фаз і природу різних включень на поверхні руйнування, що дає додаткову інформацію для визначення причин зниження опору руйнуванню в тих або інших умовах.

Мікрорентгеноспектральний аналіз дозволяє досліджувати структурну неоднорідність сплавів і вносити необхідні корективи до технологічних процесів при виготовленні деталі. Рентгеноструктурний аналіз застосовують також для вивчення зональних напружень, що дає інформацію про ступінь і глибину пластичної деформації, що передуює появі тріщин; дозволяє оцінити ступінь зміни фазового складу, щільності дислокацій, блочності і параметрів кристалічної будови в процесі руйнування.

### **3.2. Особливості будови зломів**

Поверхня злому містить залишкові ознаки, і за фрактограмою можна судити про умови навантаження, осередок руйнування і процес збільшення тріщини до остаточного руйнування. Характерні особливості будови зломів кожного даного сплаву не постійні, а змінюються певним чином залежно від зміни в'язкості матеріалу, пов'язаного з конкретною термічною обробкою і конфігурацією зразка.

**При статичному одноосьовому розтягуванні** циліндричного гладкого зразка напружений стан матеріалу характеризується такими параметрами: розтягальне напруження  $\sigma_1$  діє в поздовжньому напрямі, а стискальне  $\sigma_3$  – в поперечному, дотичне напруження  $\tau$  спрямоване під кутом  $45^\circ$  до осі зразка (рис.6). Руйнування при осьовому розтягуванні гладкого зразка починається поблизу його осі і поширюється у напрямку до поверхні. У загальному випадку для поверхні зломів характерною є наявність трьох зон: волокниста, радіальна і зона зрізу (рис.7). Залежно від структури і властивостей матеріалу зразка на зломах можуть бути відсутні деякі зони. Волокниста зона відповідає області повільного зростання тріщини, і вона оточує осередок руйнування. Ця зона поширення тріщини формується в

результаті злиття мікропустот (рис.8 а) і характерна для в'язкого руйнування. Радіальна зона характеризується переходом до швидкого (нестабільного) поширення тріщини з утворенням радіальних втомних ривчаків, які збігаються із загальним напрямом розвитку тріщини. Ці рубці, що розходяться, починаються або від периферії волокнистої зони з формуванням у цьому випадку dna «чашки», або від самого осередку руйнування з формуванням злому типу «зірочки», характерного при руйнуванні менш пластичних матеріалів. Радіальні рубці на зломах сталей є елементами зсуву, і зовнішній їх вигляд побічно залежить від в'язкості металу: чим менший об'єм металу залучений в деформацію, тим менш рельєфними стають радіальні рубці. Наприклад, у високоміцних сталях із структурою відпущеного мартенситу радіальні рубці на поверхні злому тонкі.

Зона зрізу утворюється в результаті зміни напружено-деформованого стану, і тріщина змінює напрям розвитку у бік максимального дотичного напруження з утворенням бокового кільцеподібного скосу, орієнтованого під кутом  $45^\circ$  до основної поверхні руйнування. Частка зони зрізу в загальній площі злому залежить від в'язкості матеріалу, із зменшенням в'язкості знижується частка зони зрізу в зломі.

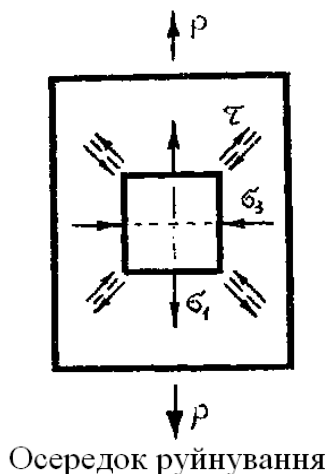


Рисунок 6 – Схема напрямку дії напруження при розтягуванні циліндричного гладкого зразка

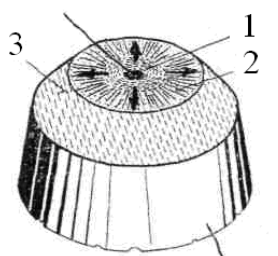


Рисунок 7 – Схема будови поверхні злому циліндричного гладкого зразка:

- 1) волокниста зона;
- 2) радіальна зона;
- 3) зона зрізу

**Макрозломи** (рис. 9) за орієнтацією до напрямку прикладеного зусилля поділяють на прямий, косий і прямий зі скосами («чашковий»). Прямим називають злом, поверхня якого орієнтована перпендикулярно до напрямку найбільших розтягувальних зусиль. Така орієнтація злому є характерною

ознакою макрокрихкого руйнування. Прямий злом зі скосами утворюється найчастіше при розтягуванні низьковуглецевих конструкційних, а також легованих сталей.

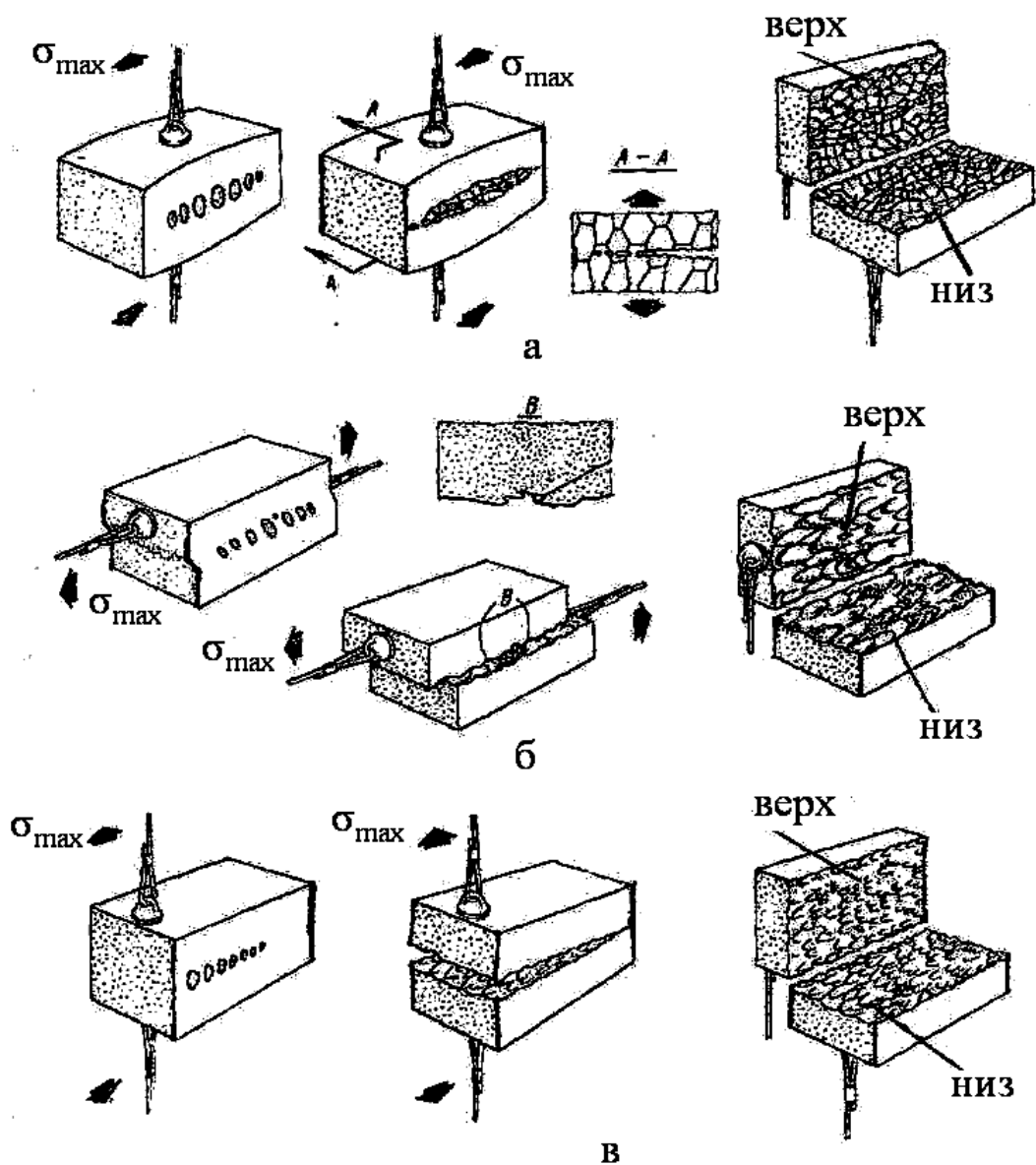


Рисунок 8 – Вплив напрямку максимального напруження ( $\sigma_{\max}$ ) на мікрорельєф поверхні злому, що утворюється шляхом злиття мікропустот:  
*а* – ямки рівновісні; *б* – витягнуті (овальні);  
*в* – подовжені

Косий злом має поверхню руйнування, орієнтовану під кутом до осі зразка, і утворюється шляхом зрізу в площині максимального дотичного напруження. Спостерігається найчастіше при руйнуванні анізотропних матеріалів з обмеженою пластичністю. Розміри скосів збільшуються із зростанням зони пластичної деформації, супутньої руйнуванню. При максимальній пластичності матеріалів у зоні розтягування чистих металів (Pb, Al, Cr) можуть утворюватися повністю конічні зломи.

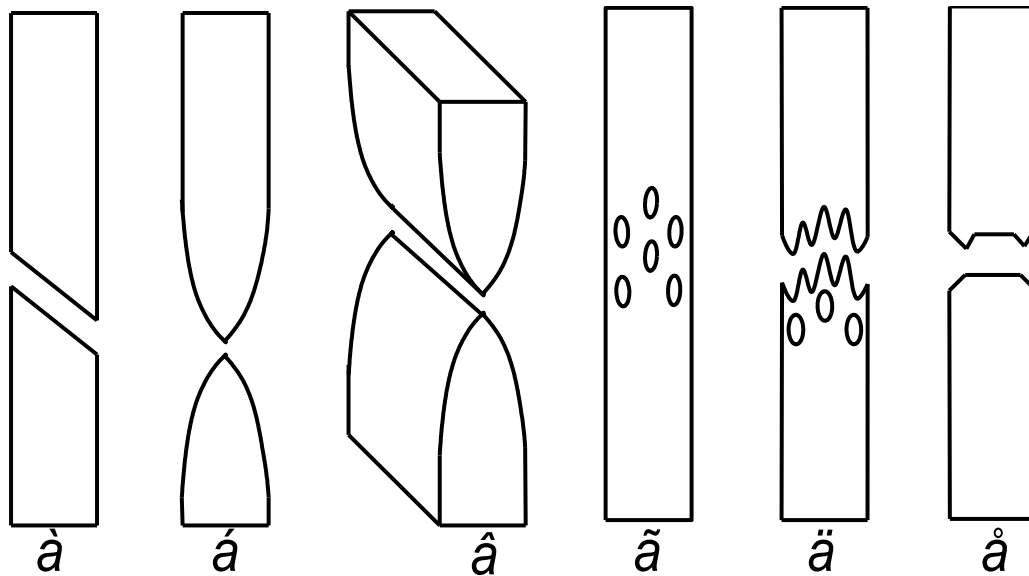


Рисунок 9 – Характерні види макрозлому при розтягуванні:  
*a* – косий ; *б* – подвійна чашка; *в* – прямий; *г* – в’язкий;  
*д* – конічний; *е* - чашка-конус

За наявності надрізу (концентратора) на поверхні циліндричного зразка в об’ємі матеріалу відбувається перерозподіл напруження в поперечному перерізі (рис.10) і на поверхні злому відсутня зона зрізу (рис.11). Розвиток руйнування походить від вершини концентратора до центра зразка, де розташовується зона долому. Частка кожної із зон у загальній площі злому залежить від величини концентрації напруження, яка залежить від глибини надрізу ( $l$ ) і радіуса ( $\rho$ ) у вершині концентратора:

$$\sigma_{\max} = 2\sigma \sqrt{\frac{l}{\rho}}.$$

Чим більше значення  $\sigma_{\max}$ , тим менше частка волокнистої зони, а збільшуються радіальна і зона долому.

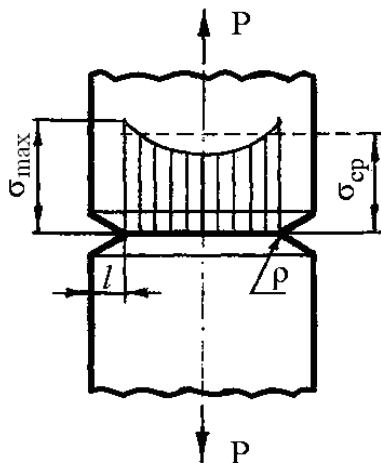


Рисунок 10 – Схема концентрації напруження за наявності надрізу на поверхні циліндричного зразка

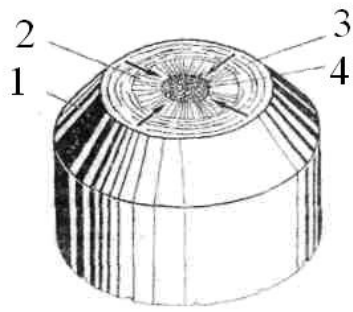


Рисунок 11 – Схема будови поверхні злому при розтягуванні циліндричного зразка з надрізом:

- 1 – поверхня надрізу;
- 2 – волокниста зона;
- 3 – радіальна зона;
- 4 – зона долому

**Форма і розміри зразків** при випробуванні визначають напружений стан у матеріалі і чинять відповідно вплив на вигляд поверхні злому. Співвідношення зон злому у квадратних і прямокутних зразках істотно відрізняється від зразків з круглим поперечним перерізом. Головна відмінність зовнішнього вигляду пов'язана з радіальною зоною.

У прямокутних зразках радіальна зона має вигляд шеврона або «ялинки» (рис.12, 13). Шевронні узорі пов'язані з нестабільним відносно швидким поширенням тріщини, і їх поява обумовлена відсутністю збігу загального напрямку розвитку тріщини і найкоротшого напрямку від фронту тріщини до вільної поверхні. Близькість вільної поверхні до фронту тріщини обумовлює зміну напрямку поширення тріщини.

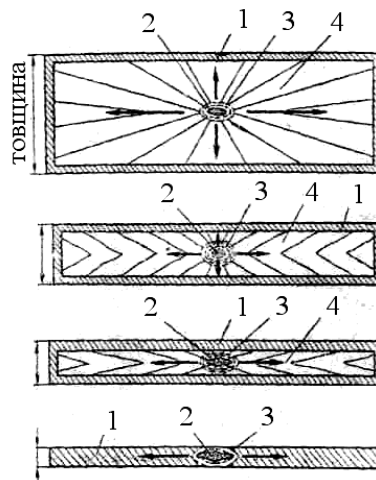


Рисунок 12 – Вплив товщини прямокутних зразків на будову поверхні злому при розтягуванні: 1 – зона зрізу; 2 – осередок руйнування; 3 – волокниста зона; 4 – радіальна зона

Радіальні рубці перестають бути прямолінійними і поширюються у напрямку до вільної поверхні. Шевронні узорі допомагають при визначенні місця розташування осередку руйнування, оскільки вершини V-подібних узорів спрямовані у бік, протилежний напрямку розвитку тріщини, таким чином, вершини узору вказують той напрям, в якому можна знайти осередок руйнування. Наприклад, при визначенні місця розташування осередку руйнування в зломах корпусів судів, трубопроводів, цистерн, балонів високого тиску, тобто при руйнуванні виробів з листового прокату.

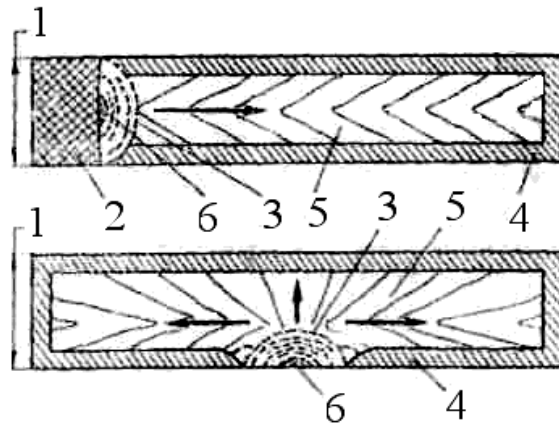


Рисунок 13 – Будова зломів на прямокутних зразках із концентратором напруження: 1 – товщина перерізу; 2 – поверхня надрізу; 3 – волокниста зона; 4 – зона зрізу; 5 – радіальна зона; 6 – осередок руйнування

При ударному згині злом являє собою поверхню поділу, що отримується шляхом руйнування згиним надрізаних зразків. Будова злomu показана на рис.14. Характерною особливістю є утягання злomu, що оцінюється величиною максимальної деформації за двома боковими площинами і залежить від механічних властивостей металу і температури випробування. Вимірюється величина утягання ( $l$ , мм) за внутрішньою поверхнею (рис.15).

Аналіз будови поверхні при ударних випробуваннях дозволяє визначити особливості розвитку тріщин при визначенні критичної температури крихкості (КТК), вплив макро- і мікронеоднорідності будови металу, дію на метал високих температур, наявності включень і несутцільності металу.

При визначенні *КТК* за основу береться визначення частки в'язкої складової в зломі серії зразків, що піддавалися випробуванням при різних температурах.

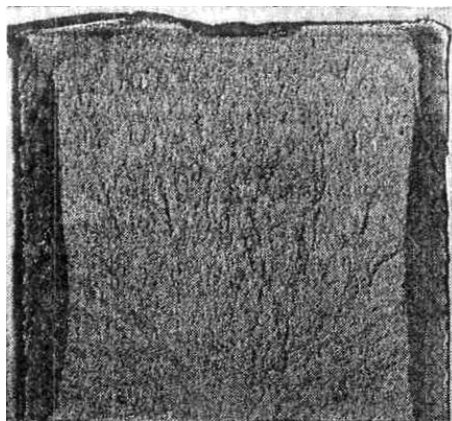


Рисунок 14 – Вигляд злomu при динамічному згині

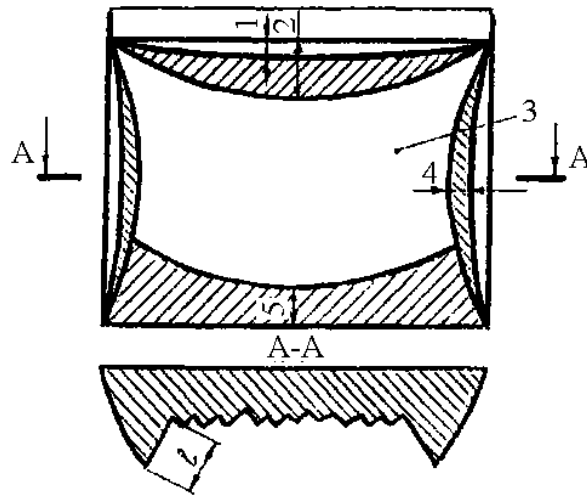


Рисунок 15 – Схема будови поверхні злому при динамічному згині: 1 – осередок руйнування; 2 – зона зародження тріщини; 3 – зона розвитку тріщини; 4 – утягання; 5 – зона долому

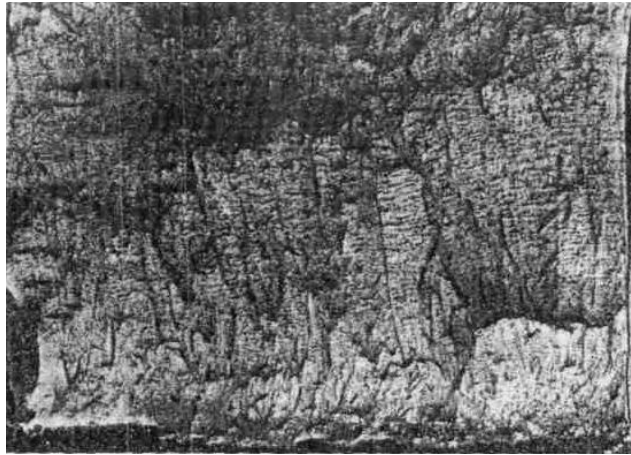
**В'язкою складовою** в зломі називають ділянки поверхні руйнування, що характеризуються при візуальному визначенні і малих збільшеннях волокнистою будовою, а при електронно-мікроскопічному – ямковим внутрішньозеренним або міжзеренним рельєфом. **Крихкою складовою** в зломі називають ділянки поверхні руйнування, що мають при макровизначенні блискучу кристалічну будову, а при ЕМ – вигляд фасеток відколу з рівчаковим узором або гладких фасеток міжзеренного руйнування. За **КТК** беруть температуру випробування, якій відповідає наявність в зломі 50% в'язкої складової.

При хімічній мікронеоднорідності злом являє собою неоднорідну поверхню руйнування, що характеризується стовбчастими кристалами з чітко вираженим рельєфом елементів дендритної будови металу, – дендритним зломом (рис.16 а), який характерний в основному для литої сталі. При порушенні режиму гомогенізації і подальшого поліпшення в зломі можуть спостерігатися окремі ділянки з дендритною будовою. Литая сталь з дендритним зломом характеризується зниженою пластичністю і ударною в'язкістю.

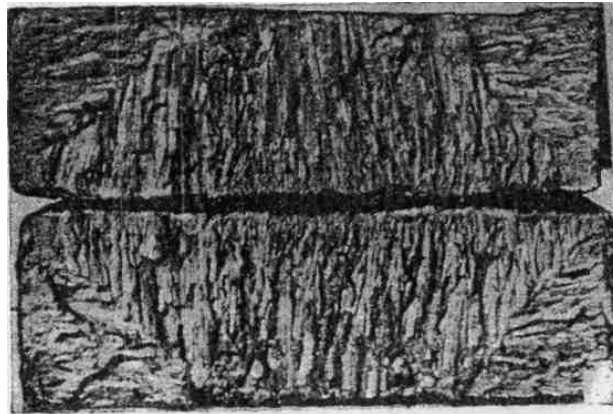
При повільному охолодженні виливок в області високих температур унаслідок ліквідаційної неоднорідності утворюються шестоваті зломи (рис.16 б), що проходять по межах первинних стовбчастих кристалів сплаву.

Забруднення сталей неметалічними включеннями (оксидами, сульфідами і окисульфідами), які при гарячій пластичній деформації набувають рядкової форми, зумовлює утворення шиферності і світлих смуг у зломі, що спостерігаються в катаній (деформованій) сталі. **Світлі смуги** являють собою появу на поверхні руйнування крупних скупчень розкатаних неметалічних включень у вигляді гладких ділянок без явно вираженої кристалічної будови.





*а*



*б*

Рисунок 16 – Будова поверхні зломів виливок, обумовлених хімічною мікронеоднорідністю: а – дендритний злом; б – шестоватий злом

Забрудненість сталі сіркою виявляють за методом Баумана.

**Шиферність** являє собою дрібні розщеплювання (розшарування), що мають шарувато-ступінчасту будову і орієнтовані паралельно поверхні деформації. Слід відрізнити шиферність від розшарування, яке пов'язане з наявністю тріщин у деформованому металі, що утворюються при розплющуванні (розкочуванні) пустот литого металу. При шиферності кожне розщеплювання має двостороннє утягання і на поперечних шліфах протяжність розшарування незначна (рис.17) за наявності ряду неметалічних включень і відсутності мікронесуцільності.

Для високовуглецевих конструкційних сталей унаслідок розпаду карбідів через тривалий відпал при випробуваннях може спостерігатися чорний злом. Він являє собою ділянки поверхні крихкого руйнування, що проходять по виділеннях графіту, з лускоподібною поверхнею.

Для литих і деформованих сталей, схильних до водневої крихкості, в зломах можуть спостерігатися **флокени**, які являють собою внутрішні транскристалітні тріщини, що виникають в зонах металу з підвищеним вмістом водню. Флокени виявляються на поверхні руйнування у вигляді чітко окреслених ділянок круглої або овальної форми, якщо їх поверхні збігаються.

На поверхні руйнування поперечних проб прокату флокени мають вигляд коротких тріщин, що нагадують дрібні розшарування (рис.18). Флокени найчастіше зустрічаються у великогабаритних сталевих поковках і в сталевих конструкціях через прискорене охолодження при температурах нижче 400°C. Наявність флокенів обумовлює зниження міцності, пластичності і ударної в'язкості.

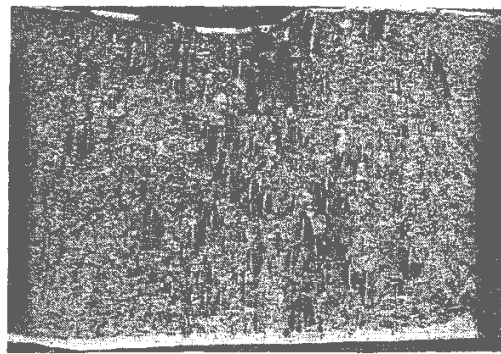
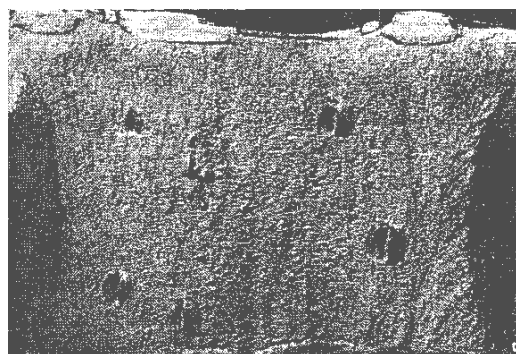


Рисунок 17 – Шиферність на поверхні злому



*a*



*б*

Рисунок 18 – Флокени на поверхні злому: *a* – паралельно площині злому; *б* – перпендикулярно до площини злому

**Дія високих температур**, як правило, сприяє розвитку крихкого руйнування з кристалічною будовою поверхні злому без помітних ознак макропластичної деформації.

Розрізняють такі види зломів:

- каменеподібний;
- нафталіністий.

**Каменеподібний** (рис.19 *а, б*) являє собою поверхню руйнування, що проходить повністю або частково по зернограничних об'ємах і характеризується грубозернистою горбкуватою будовою, найчастіше з металевим блиском. Спостерігається в литих і деформованих сталях.

Каменеподібний злом у сталі розрізняють двох видів: *первинний* і *вторинний*.

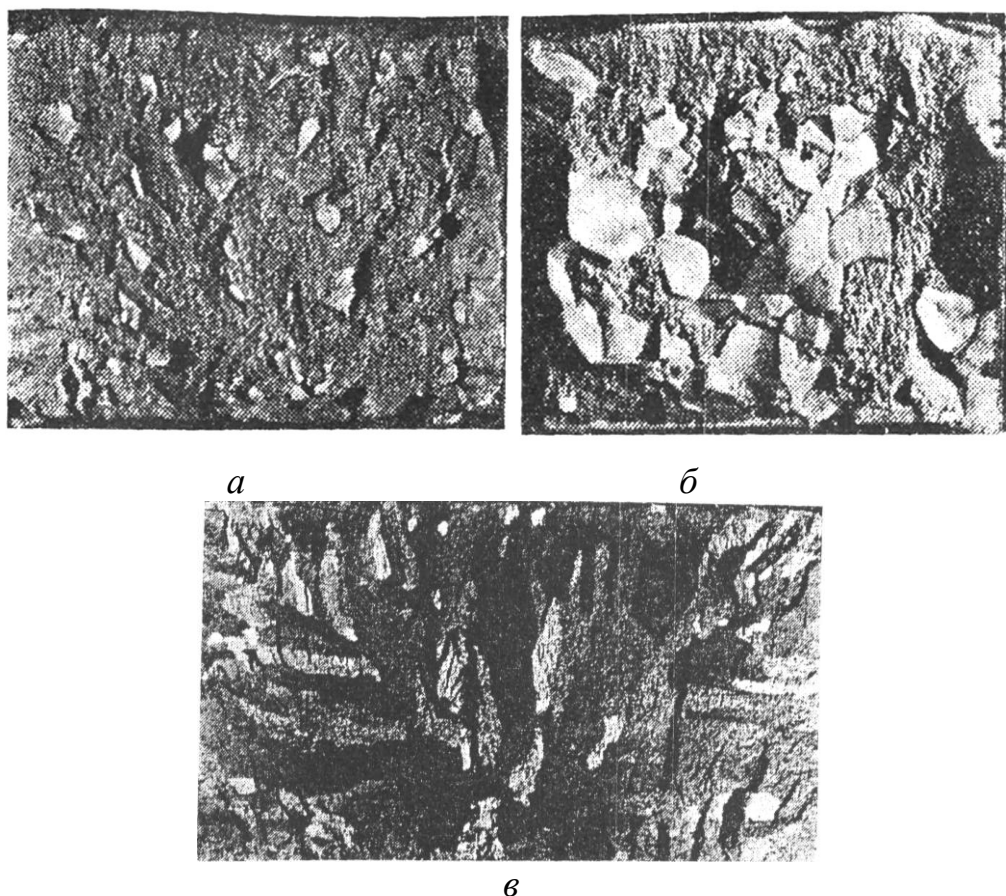


Рисунок 19 – Будова поверхні зломів, обусловлених дією високих температур: *а, б* – каменеподібний; *в* – нафталіністий

**Первинний злом** спостерігається у відливках або заготовках для ОМД, що не піддаються термічній обробці, і пов'язаний з утворенням гранульованої структури аустеніту, що формується після кристалізації в області високих температур при сповільненому охолодженні. На межах зерен виділяються надлишкові обмежено розчинні в  $\gamma$ -фазі: сульфіди, нітриди, фосфіди, карбіди і деякі легувальні елементи. Виникнення *вторинного злому* пов'язане з перегрівом металу перед гарячою

деформацією або при термічній обробці. При такому нагріванні також відбувається збагачення зернограничних об'ємів, що знову утворилися, різними виділеннями (карбіди, нітриди, фосфіди, карбіди та інш.), але частинки значно дрібніші, ніж у первинному каменеподібному зломі. Сталь, що має каменеподібний злом, може бути покращена двома шляхами: високотемпературною гомогенізацією при 1100°C або гарячою деформацією. Каменеподібний злом може утворитися при руйнуванні легованих сталей, схильних до відпускнуї крихкості. Це явище може бути усунене нормалізацією або прискореним охолодженням з високотемпературного відпуску.

До дефектів, що практично не усуваються, викликані порушеннями термічної і гарячої обробки, відносять *нафталіністий* (рис.19 в) злом, який являє собою поверхню руйнування, що проходить по кристалографічних площинах грубозернистого аустеніту, і плоскі ділянки мають характерний селективний блиск, що змінюється при зміні кута падіння світла. Причина утворення – наслідування продуктами розпаду текстури крупних зерен аустеніту при перетворенні  $\gamma \rightarrow \alpha$ . Спостерігається в основному в литих конструкційних сталях, а також швидкорізальних сталях у результаті багатократних нагрівань при гарячій деформації без проміжного відпалу.

При циклічному прикладенні навантаження спостерігається втомний злом (рис.20), на якому є такі зони:

- фокус злому – мікроскопічне місце зародження злому;
- осередок руйнування – макроскопічне місце зародження злому;
- ділянка вибіркового розвитку тріщини;
- ділянка прискореного розвитку тріщини, що утворюється перед остаточним руйнуванням зразка або деталі;
- зона долому.

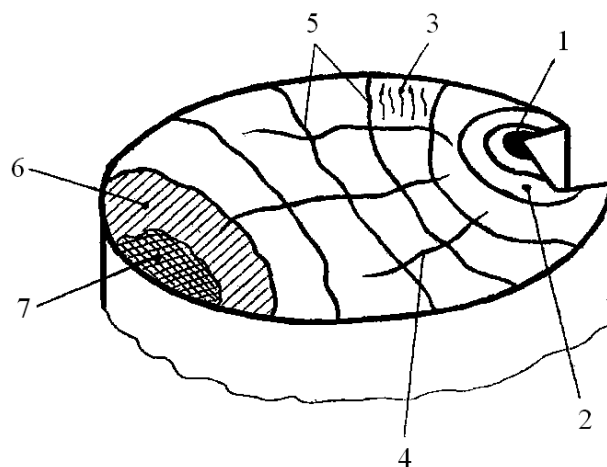


Рисунок 20 – Схема будови поверхні втомного злому:

- 1 – осередок руйнування; 2 – приосередкова зона; 3 – втомні рівчаки; 4 – сходи скидання; 5 – втомні лінії; 6 – ділянка прискореного розвитку тріщини; 7 – зона долому

Будова втомних зломів залежить в основному від трьох умов: виду навантаження в процесі зародження і розвитку втомної тріщини; дії зовнішнього середовища; опору руйнуванню матеріалу деталі, який визначається її геометричною формою, властивостями металу і станом поверхні. Осередки руйнування містяться, як правило, на поверхні деталі, в місцях концентрації напруження різного роду дефектів або межі зміцненого шару з серцевиною. Відмітною особливістю мікрорельєфу втомного злomu є наявність *тракових слідів або втомних рівчаків (ліній)*, які являють собою систему заглиблень, що повторюються, і виступів, орієнтованих перпендикулярно до напрямку розвитку тріщини і є слідом її переміщення за кожний цикл навантаження (рис.21).

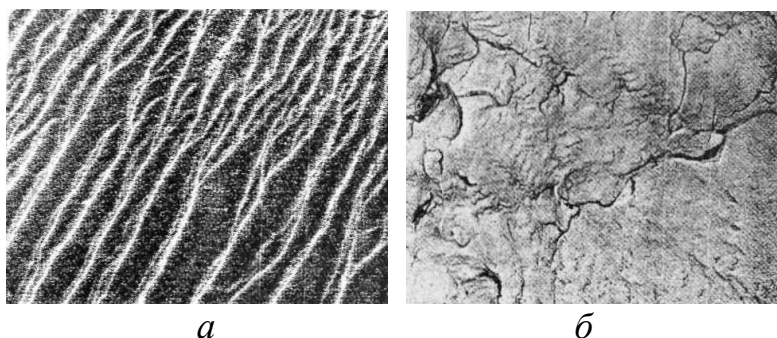


Рисунок 21 – Особливості мікрорельєфу злomu в зоні розвитку тріщини:  
*a* – втомні рівчаки; *б* – «траковий» слід

Відстань між рівчачками корелює зі швидкістю поширення тріщини і умовами навантаження. При дослідженні втомних зломів можуть спостерігатися всі елементи мікрорельєфу крихкого і в'язкого руйнування.

Сходинки скиду утворюються в результаті об'єднання між собою так званих вторинних тріщин, що розвиваються вглиб від магістральної втомної тріщини. Сходинки скиду часто розташовуються в радіальному напрямі і побічно показують напрям розвитку руйнування.

У міру розвитку і зростання магістральної тріщини зменшується живий переріз матеріалу виробу і зростає швидкість руйнування, що формує перехідну ділянку перед кінцевим руйнуванням – зони долому, яка утворюється за один або декілька циклів. Чим більше величина напруження, що діє, тим більшу площу в зломі займає зона долому. Вплив вигляду і величини циклічного напруження на макробудову злomu схематично наведені у табл. 1. Відношення площ зони долому до поверхні злomu з поширенням тріщини характеризує «живучість» матеріалу. Чим менше значення цього відношення, тим менша вірогідність крихкого катастрофічного руйнування деталі.

У процесі експлуатації наявність дефектів металургійного характеру може стати осередком руйнування, і тоді макробудова злomu має інший вигляд: зона втомного розвитку тріщини знаходиться в центральній частині, а зона долому – на поверхні виробу.

Таблиця 1 – Схеми втомних зломів сталевих прутків, до яких прикладені різні циклічні навантаження

Навантаження зразків		Гладкі прутки		Прутки з місцевою концентрацією напружень			
Назва	Схема	сильно навантажені	слабо навантажені	значною		незначною	
				сильно навантажені	слабо навантажені	сильно навантажені	слабо навантажені
		1	2	3	4	5	6
1. Розтягування (стискання)							
2. Односторонній згин							
3. Двосторонній згин							
4. Кручення зі згином							

#### 4. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

У роботі студенти знайомляться із загальними положеннями при дослідженні поверхонь руйнування, отриманих як у лабораторних умовах, так і в процесі експлуатації.

Викладач пропонує по 3-5 зразки зі зломами за різних умов навантаження, а бригада студентів виконує дослідження макроструктури зломів і результати заносить в табл. 2.

Візуальна оцінка характеру руйнування передбачає: визначення характеру руйнування, осередку руйнування, наявність концентраторів або дефектів, напружень тощо.

Таблиця 2 – Результати дослідження зломів

Номер зразка	Марка матеріалу	Вид обробки	Візуальна оцінка характеру руйнування	Характер навантаження	Макро-аналіз зон руйнування	Співвідношення зон руйнування

## 5. ЗМІСТ ЗВІТУ

- 6.1. Мета роботи.
- 6.2. Загальна характеристика зон руйнування при різних видах навантаження.
- 6.3. Аналіз виданих викладачем видів зломів.
- 6.4. Таблиця результатів дослідження зломів.
- 6.5. Висновки про проведену роботу.

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. На чому ґрунтується діагностика відмов?
2. Що таке «фрактографія»?
3. Які завдання вирішує фрактографія?
4. Методи аналізу, що використовуються у фрактографії.
5. Які основні ознаки зломів використовують при їх класифікації?
6. Назвіть особливості макрофрактографії.
7. Назвіть особливості мікрофрактографії.
8. Спільність і відмінність в методах РЕМ і ПЕМ.
9. У чому виявляється крихке і в'язке руйнування на зломах?
10. Чим відрізняється будова злому при статичному розтягуванні від динамічного згину?
11. В чому полягає спільність і відмінність в будові зломів циліндричного і прямокутного зразків при розтягуванні?
12. Спільність і відмінність в будові зломів при статичному і циклічному навантаженні.
13. Які дефекти будови матеріалу можна виявити при ударному навантаженні?
14. Що таке «втомні рівчаки»?
15. Як впливає наявність надрізів на будову злому циліндричного зразка при статичному і циклічному навантаженні?
16. У яких випадках необхідно застосовувати структурну фрактографію?
17. Що можна визначити за орієнтацією злому до напрямку прикладеного зусилля?
18. Що характеризує дендритний злом?
19. Що характеризує шиферний злом?
20. Що характеризує каменеподібний злом?
21. Які чинники впливають на утворення осередку руйнування при циклічному навантаженні?
22. Спільність і відмінність в наявності на зломах сходинок скиду і радіальних рубців.
23. Як впливає схема циклічного навантаження на вигляд макрозломів?

## ЛІТЕРАТУРА

1. Балтер М. А. Фрактография – средство диагностики разрушенных деталей. – М. : Машиностроение, 1987. –160 с.
2. Герасимова Л. П. Изломы конструкционных сталей / Л. П. Герасимова, Н. И. Маресев. – М. : Metallurgy, 1987. – 272 с.
3. Гладан В. Т. Технология металлов и других конструкционных материалов / В. Т. Гладан, Б. Г. Гринберг, В. Я. Никонов. – М. : Высшая школа, 1970. – 704 с.
4. Коцаньда С. Усталостное разрушение металлов. С. Коцаньда – М. : Metallurgy, 1976. – 456 с.
5. Методичні вказівки до виконання контрольних робіт з дисципліни «Технологія конструкційних матеріалів та матеріалознавство» для студентів-заочників напрямів підготовки 0923 – зварювання, 0902 – інженерна механіка. Ч. 2. Матеріалознавство / Уклад. В. Г. Байло, Т. Ф. Архіпова. – Вінниця : ВНТУ, 2004. – 60 с.
6. Солнцев Ю. П. Материаловедение / Ю. П. Солнцев, В. А. Веселов и др. – С.-Петербург : Химиздат, 2004. – 384 с.
7. Фридман Л. Б. Механические свойства металлов./ Л. Б. Фридман – М. : Машиностроение, 1974. – 368 с.



*Електронне видання*

Методичні вказівки до виконання  
лабораторної роботи «Макроскопічне дослідження поверхні зломів  
деталей машин» з дисципліни „Технологія зміцнення поверхонь ” для  
студентів напряму підготовки 6.050504 ”Зварювання” всіх форм навчання

Укладачі: Архіпова Тетяна Федорівна

Оригінал-макет підготовлено Архіповою Тетяною Федорівною

Підписано до друку 010/10/2010  
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний  
Гарнітура Times New Roman.  
Друк різнографічний. Ум. друк. арк.  
Наклад прим. Зам. № 9

Вінницький національний технічний університет,  
навчально-методичний відділ ВНТУ.  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,  
ВНТУ, ГНК, к.2201.  
Тел.(0432) 59-87-36.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті  
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі.  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,  
ВНТУ, ГНК, к. 114.  
Тел. (0432) 59-87-38.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.