

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ**

**В.З. КУЦОВА, Н.М. ФЕДОРКОВА**

**ЕКСПЕРТИЗА МАТЕРІАЛІВ ТА  
МЕТАЛІВ**

**Дніпропетровськ НМетАУ 2015**

УДК 621.382

Куцова В.З., Федоркова Н.М. Експертиза матеріалів та металів: Навч. посібник.  
– Дніпропетровськ: НМетАУ, 2015. – 51 с.

Наведені теоретичні основи матеріалознавчої та металознавчої експертизи. Описуються основні принципи та методики встановлення причин руйнування різних матеріалів, а також чинники, що впливають на процеси руйнування деталей машин та механізмів, зварних з'єднань, конструкцій, тощо.

Призначений для студентів спеціальностей  
7(8)05040301 – прикладне матеріалознавство,  
7(8) 05040304 – металознавство.

Іл. 29. Табл. 1. Бібліогр.: 5 найм.

Друкується за авторською редакцією.

Відповідальна за випуск                    Н.М. Федоркова, канд. техн. наук, доц.

Рецензенти:                    В.С. Вахрушева, д-р техн. наук, проф. (ПДАБА)  
    Р.П. Дідик Р.П., д-р техн. наук, проф. (НГУ)

© Національна металургійна академія  
України, 2015

© Куцова В.З., Федоркова Н.М., 2015

## ЗМІСТ

1	Вступ .....	4
1.1	Документальне оформлення експертного висновку. Підстави для проведення експертизи .....	6
2	Методи, використовувані при проведенні матеріалознавчої / металознавчої експертизи .....	7
3	Основи факсимільної фотографії .....	10
3.1	Спотворення форми об'єкта, пов'язані із взаємним розташуванням його і об'єктива .....	11
3.2	Освітлення об'єкта .....	12
3.3	Вибір фотографічного устаткування і матеріалів .....	14
4	Методи дослідження якості зварних з'єднань .....	16
4.1	Проби на щільність .....	16
4.2	Методи випробувань зварних з'єднань .....	17
4.3	Аналіз структури зварного шва .....	18
4.4	Загальні положення для оцінки структур зварних з'єднань .....	20
5	Основи методики встановлення причин руйнування деталей ...	26
5.1	Оцінка загального стану об'єкта дослідження .....	27
5.2	Аналіз зовнішнього стану .....	28
5.3	Оцінка якості виготовлення і матеріалу деталі .....	32
5.4	Аналіз умов роботи деталі .....	35
5.5	Узагальнення результатів дослідження .....	37
6	Визначення причин утворення тріщин у металі по мікроструктурі .....	38
6.1	Визначення причин тріщиноутворення по зламах .....	38
6.2	Можливі причини утворення тріщин і мікротріщин при термічній обробці деталей .....	39
	Додатки ... ..	41
	Рекомендована література .....	50

## 1 ВСТУП

Руйнування деталей і частин конструкцій під дією різних навантажень, що у багатьох випадках супроводжуються корозійною і температурною дією, призводить до виходу з ладу відповідальних вузлів або навіть усієї конструкції або механізму в цілому. Тому останніми роками приділяється багато уваги вивченню процесу деформації і руйнування, як в лабораторних умовах, так і при експлуатації залежно від механічних, фізичних і фізико-хімічних чинників. Проте, незважаючи на численні цінні результати цих робіт, закони і причини дійсного руйнування і виходу з ладу матеріалів ще далеко не з'ясовані.

**Інженерно-технологічна експертиза** – є один із найскладніших видів інженерно-технічних експертиз.

За юридичним статусом технічна експертиза проводиться за дорученням, як органів слідства, так і суду.

За своїм призначенням експертиза техніки групується за ознакою промислового, побутового, ігорного, будівельного або медичного призначення.

За місцем виготовлення експертиза устаткування - ділиться на експертизу устаткування вітчизняного і іноземного виробництва.

Судово-технічна експертиза – затребувана по суперечках про постачання неякісного (несправного, бракованого, пошкодженого) устаткування.

Судова технічна експертиза – проводиться у справах про розірвання договорів постачання техніки і устаткування, цивільного, промислового або медичного призначення.

### **Основні визначення**

*Експертиза промислової безпеки (далі експертиза)* – оцінка відповідності об'єкта експертизи вимогам промислової безпеки, що пред'являються до нього, результатом якої є висновок.

*Об'єкти експертизи* – проектна документація, технічні пристрої, будівлі і споруди на небезпечному виробничому об'єкті, декларації промислової безпеки і інші документи, пов'язані з експлуатацією небезпечного виробничого об'єкта.

*Система експертизи промислової безпеки (далі Система експертизи)* – сукупність учасників експертизи промислової безпеки, а також норм, правил, методик, умов, критеріїв і процедур, у рамках яких організовується і здійснюється експертна діяльність.

*Ліцензія* – спеціальний дозвіл на здійснення конкретного виду діяльності при обов'язковому дотриманні ліцензійних вимог і умов, видане ліцензуючим органом юридичній особі або індивідуальному підприємцеві.

*Експертна організація* – організація, що має ліцензію Держміськтехнагляду країни на проведення експертизи промислової безпеки відповідно до чинного законодавства.

*Висновок експертизи* – документ, що містить обгрунтовані висновки про відповідність або невідповідність об'єкта експертизи вимогам промислової безпеки.

*Експерт* – фахівець, що здійснює проведення експертизи промислової безпеки.

*Замовник* – організація, що звернулася із заявкою на проведення експертизи.

**Матеріалознавча експертиза** – це предмет, що узагальнює знання, отримані при вивченні матеріалознавства, металознавства, технології виробництва і обробки металів і методів дослідження і аналізу металів.

**Основне завдання** – встановлення складу, структури, походження матеріалів, а також виявлення причин його руйнування. Тому фрактографія є складовою частиною матеріалознавчої експертизи. Основним документом, що узагальнює результати експертного аналізу, є експертний висновок.

Цей документ включає однозначні відповіді на питання, що виносяться на експертизу. При проведенні експертизи використовуються усі відомі методи аналізу матеріалів в порядку збільшення локальності. Локальність (роздільна здатність) використовуваного методу вважається достатньою, якщо вона дозволяє дати однозначну відповідь на ті, що виносяться на експертизу питання.

Основні завдання матеріалознавчої експертизи:

1. Визначення хімічного складу речовини.
2. Визначення структурних характеристик речовини.
3. Атомна будова речовини (кристалічна будова, встановлення аморфності речовини).
4. Наявність макро- і мікродефектів.
5. Визначення причин, умов і енергоємності руйнування речовини.
6. Визначення відповідність матеріалів умовам їх експлуатації.

7. Відповідність матеріалу його паспортним характеристикам.

*Металознавча експертиза* є складовою частиною матеріалознавчої експертизи, займається експертизою металів (сплавів) і робиться з метою виявлення металевих часток і слідів металізації на об'єктах, дослідження якісного і кількісного складу металів і сплавів і виробів з них, встановлення технології та часу виготовлення виробів з металів і сплавів, умов їх експлуатації, видозмін, пов'язаних з обставинами цієї події.

Об'єкти металознавчої експертизи дуже різноманітні. Найбільш поширеними є вироби зі сталі і їх заготівлі: саморобні і заводського виготовлення ножі, кинджали, кортики, кастети і інші сталеві предмети, що служать зброями злочину, їх фрагменти, уламки; осколки і деталі вибухових пристроїв, снарядів, мін; частини зруйнованих деталей автотранспортних засобів і інших механізмів тощо.

Об'єкти металознавчої експертизи вилучаються практично по усіх категоріях карних і громадських справ і можуть бути об'єктами дослідження не лише експертизи цього роду, але і комплексною металознавчою, інших класів і видів експертиз: трасологічною, електротехнічною, пожежно-технічною, балістичною, вибухотехнічною, автотехнічною.

### **1.1 Документальне оформлення експертного висновку. Підстави для проведення експертизи**

Матеріалознавчу експертизу можуть проводити штатні експерти і експерти за призначенням. Підставою для проведення експертизи являється розпорядження, підписане прокурором району або міста по місцю скоєння злочину, складене на підставі відповідної заяви слідчих органів з обґрунтуванням необхідності проведення матеріалознавчого експертного аналізу.

Для проведення експертизи експертові передаються наступні документи і матеріали :

- розпорядження про призначення експертизи;
- матеріали справи, що містять інформацію про характер злочину і висновок по інших видах експертного аналізу;

– питання, що виносяться на експертизу, в яких чітко сформульовані основна мета аналізу і положення, які мають бути *підтверджені* або *спростовані*;

– речові докази, що становлять основу експертного аналізу. Усі документи і матеріали передаються в запечатаному вигляді, згідно з вкладеним описом. При проведенні експертизи експерт зобов'язаний провести порівняння документів з описом, що додається.

Термін проведення експертизи не більший за один місяць. Експертний висновок повинен обов'язково містити наступні розділи:

1. Загальний опис вирішуваної задачі.
2. Перелік питань, що виносяться на експертизу і перерахування методів аналізу, які використовуються при виконанні цієї роботи.
3. Детальний опис дій і інтерпретація отриманих результатів по кожному з питань, що виносяться на експертизу.
4. Обов'язково включаються фотографії, графіки, які були отримані спочатку (фототаблиці).
5. Висновки, де в короткій формі наводяться відповіді на поставлені питання.
6. Додаткові матеріали по експертному аналізу.

## **2 МЕТОДИ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ ПРИ ПРОВЕДЕННІ МАТЕРІАЛОЗНАВЧОЇ / МЕТАЛОЗНАВЧОЇ ЕКСПЕРТИЗИ**

Усі методи діляться на дві групи:

### 1. Руйнівного аналізу:

– макро- і мікроскопічний аналіз за допомогою оптичних систем (визначення структурних параметрів матеріалу і визначення фазового складу методом виборчого протравлення).

2. Неруйнівного контролю (ультразвуковий дефектоскопічний аналіз, рентгеноструктурний, деякі способи спектрального аналізу).

До першої групи відносяться:

– електронна мікроскопія, що просвічує, за допомогою якої проводиться тонкий аналіз, коли можна визначити ступінь кристалічності матеріалу,

кількість дефектів і їх види, визначити кількісну кристалічну будову за допомогою електронної дифракції (роздільна здатність до  $0,1 \text{ \AA}$ );

– растрова електронна мікроскопія (має велику глибину різкості, роздільна здатність до  $15 - 30 \text{ \AA} = 1,5 - 3 \text{ нм}$ );

– визначення хімічного складу матеріалу:

а) макроскопічний метод - спектральні способи і способи аналітичної хімії;

б) мікроскопічні методи:

– рентгеноспектральний мікроаналіз;

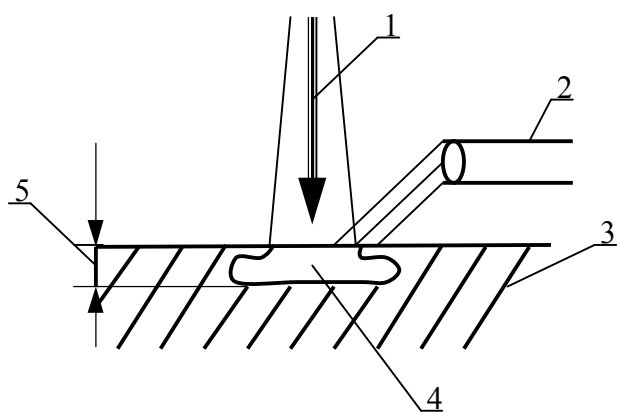
– мас-спектроскопія (при масі домішок до  $0,001\%$ ),

і оже-спектроскопія (рисунок 2.1, а);

– іонна і автоіонна мікроскопія (іони  $\text{Na}^+$ ).

**Оже-спектроскопія.** Суть методу оже-електронної спектроскопії полягає в тому, що поверхню матеріалу опромінюють пучком електронів певної енергії, під впливом якого відбувається збудження атомів досліджуваної речовини, внаслідок чого вони починають випускати вторинні Оже-електрони. Ці електрони реєструються за допомогою спектрометра. Оже-електрони є характеристичними; їх енергію для кожного досліджуваного елемента і, отже, хімічний склад досліджуваного об'єкта визначають по списках енергетичного спектру.

Оже-електрони – це електрони, що належать атомним оболонкам, збуджувані електромагнітним випромінюванням. Вони утворюються під час переходу електронів з одного електронного рівня на інший під дією енергії зовнішніх електронів високої енергії (рисунок 2.1).



1 – електронний зонд, 2 – детектор оже-електронів, 3 – досліджувана речовина, 4 – область збудження оже-електронів, 5 – товщина області збудження в  $1 \div 10 \text{ \AA}$

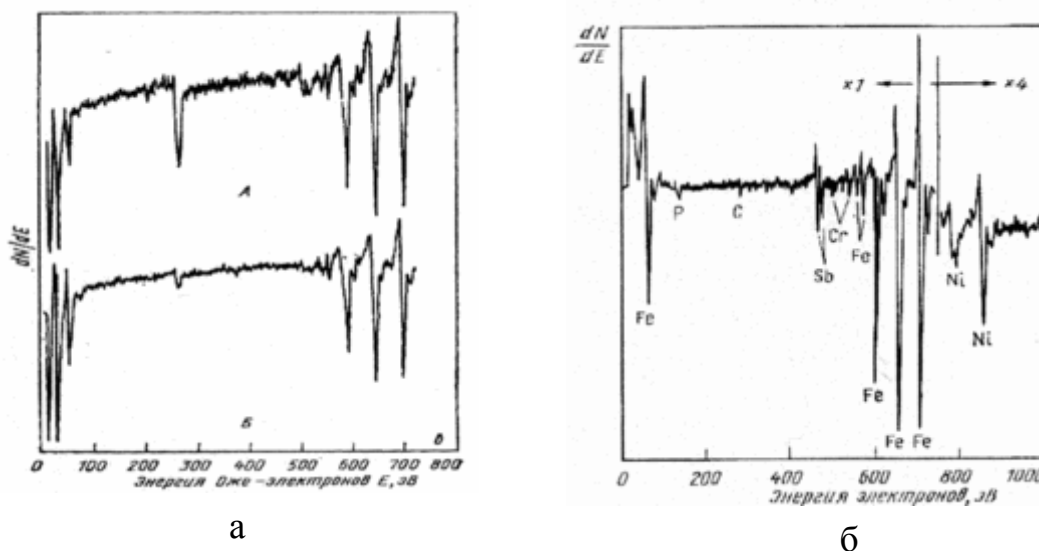
Рисунок 2.1 – Схема проведення досліджень методом оже-спектроскопії



Енергія Оже-електронів невелика, тому вони інтенсивно поглинаються досліджуваним матеріалом, і тільки Оже-електрони, що випускаються атомами поверхневих шарів зразка (до глибини близько 10 атомних шарів), реєструються спектрометром. Це визначає ефективність використання методу ОЕС для визначення хімічного складу поверхні металевих матеріалів. Крім того, малий діаметр первинного пучка електронів дозволяє забезпечити локальність методу по площі в межах від 5 до 50 мкм<sup>2</sup>. Метод легко поєднується з растровою електронною мікроскопією, що дає можливість безпосередньо в процесі вивчення морфології поверхні руйнування проводити прицільний хімічний мікроаналіз елементів зламу.

Метод відрізняється високою чутливістю при проведенні хімічного аналізу поверхневих шарів завтовшки до 2-3 нм і швидкістю проведення аналізу. З його допомогою можна виявити усі хімічні елементи, окрім водню і гелію. Метод особливо ефективний при визначенні в сталях неметалічних включень, що містять сірку (чутливість при аналізі сірки досягає 10<sup>-4</sup>%), і домішок сурми і миш'яку.

На рисунку 2.2 показані Оже-спектри поверхні руйнування сталі з перлітовою структурою і плівкових включень, що викликають появу крихких ділянок зламу.



а – Оже-спектр зламу поверхні руйнування катаної сталі 30ХН з перлітовою структурою: А – спектр в ділянці цементиту; б – спектр в ділянці фериту, б – Оже-спектр плівкового включення, що утримує сурму на поверхні руйнування катаної сталі типу 30ХГСНА

Рисунок 2.2 — Оже-спектри різних металевих матеріалів

### 3 ОСНОВИ ФАКСИМІЛЬНОЇ ФОТОГРАФІЇ

Початок експертного аналізу пов'язаний з обов'язковим фотографуванням об'єктів, представлених на експертизу.

Факсимільною називається фотографія, що відображає зображення об'єкта без спотворення його форми і будови.

Основні чинники, що впливають на спотворення форми об'єкта при його фотографуванні:

1. Нерівномірність заломлення світлових променів в лінзових системах фотокамер і фотоапаратів – сферична аберація – тобто різне заломлення монохроматичних променів, що проходять через різні ділянки лінзи (рисунок 3.1).

2. Нерівномірність і спотворення колірної гамми об'єкта із-за залежності коефіцієнта заломлення світла в лінзових системах від його довжини хвилі – хроматична аберація (рисунок 3.2). Вона обумовлена тим, що при використанні не монохроматичного світла промені з меншою довжиною хвилі заломлюються лінзою сильніше, ніж промені з більшою довжиною хвилі. В результаті виникають зображення з різною величиною.

3. Зменшення чіткості зображення внаслідок обмеженої глибини фокусу лінзових систем.

4. Спотворення форми об'єкта при неправильному розташуванні оптичної осі камери і геометричного центру об'єкта (рисунок 3.3).

5. Неправильне освітлення об'єкта і пов'язана з цим зміна його форми.

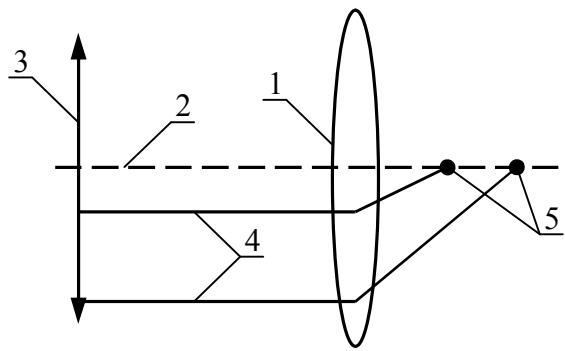
*Фокус* або *фокусна відстань*  $F$  – це максимальна відстань до об'єкта фотографування, на якому об'єкт видно чітко, і його контури не розпливчаті. Величина, зворотна фокусній відстані називається оптичною силою лінзи  $D$  (вимірюється в діоптріях).

$$D = \frac{1}{F}, \quad \text{де} \quad F = 15 \div 600 \text{ мм.}$$

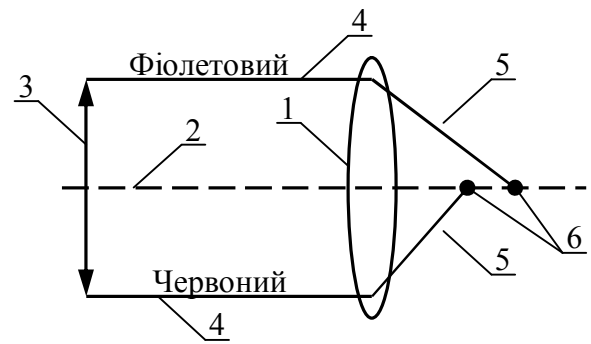
Вплив сферичної аберації проявляється в наступному:

1. Чіткість зображення убуває в напрямі від геометричного центру об'єкта до його периферії;

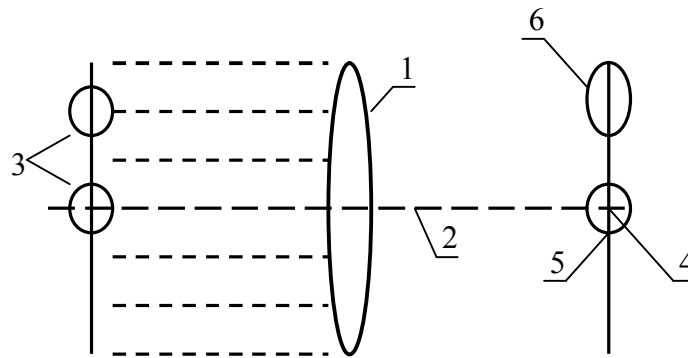
2. У цьому ж напрямі спостерігається спотворення форми об'єкта у бік збільшення його розміру.



1 – лінза, 2 – оптична вісь  
 3 – об'єкти, 4 – промені світла  
 5 – різні фокуси від променів,  
 заломлених в різних місцях лінзи  
 Рисунок 3.1 – Сферична аберація



1 – лінза, 2 – оптична вісь  
 3 – об'єкт, 4 – промені світла різної  
 довжини, 5 – заломлення променів  
 світла лінзою, 6 – різні фокуси  
 заломлених променів  
 Рисунок 3.2 – Хроматична аберація



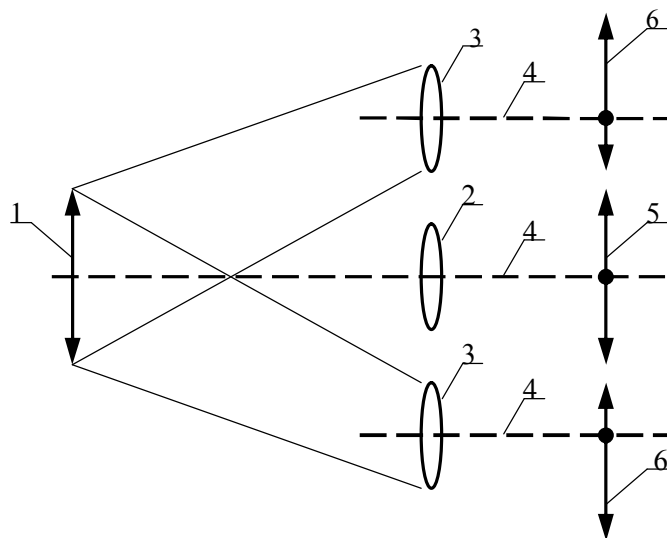
1 – лінза, 2 – оптична вісь, 3 – об'єкти, 4 – фокус лінзи,  
 5 – зображення об'єкта, що знаходиться на оптичній осі,  
 6 – спотворене зображення об'єкта, що не знаходиться на оптичній осі  
 Рисунок 3.3 – Розмиття форми об'єкта у міру видалення від фокусу лінзи

*Сферична* аберація може бути усунена використанням діафрагмування, а *хроматична* аберація – спеціальним покриттям лінз.

### 3.1 Спотворення форми об'єкта, пов'язані із взаємним розташуванням його і об'єктива

У будь-якому об'єктиві завжди можна визначити його геометричний центр, який вважається оптичним центром при подальшому його фотографуванні.

Факсимільна фотографія – це фотографія, зроблена лінзою що знаходиться на одній лінії з оптичним центром об'єкта. Якщо ж об'єктив фотоапарата (лінза) знаходиться вище або нижче оптичного центру об'єкта, то зображення об'єкта на фотографії буде спотворено (рисунок 3.4).



1 – об'єкт, 2 – фронтальна лінза,  
3 – лінзи, розташовані вище або  
нижче оптичного центру об'єкта,  
4 – оптичні осі лінз,  
5 – факсимільне зображення  
об'єкта, 6 – спотворені зображення  
об'єктів

Рисунок 3.4 – Вплив положення лінзи на зображення

Як видно з рис. 3.4, якщо лінза знаходиться вище за оптичний центр об'єкта, то на зображенні нижня половина об'єкта буде зменшена в розмірах, а верхня половина, навпаки, збільшена; якщо ж лінза знаходиться нижче оптичного центру об'єкта, то спотворення відбуватимуться за зворотною схемою.

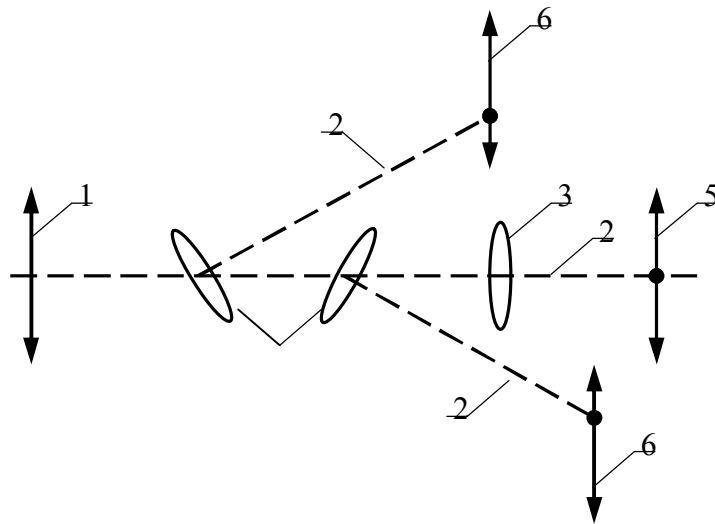
Аналогічний вплив робить нахил фронтальної лінзи об'єктива відносно оптичного центру (рисунок 3.5).

Таким чином, факсимільне зображення виходить при паралельності лінз до осі фотографованого об'єкта, і так само розташування фронтальної лінзи впливає на переріз об'єкта (рисунок 3.6).

Нахил лінзи призводитиме до аналогічних змін форм об'єктів. Спотворення подовжніх розмірів об'єкта досягається за допомогою спеціальних фотографічних об'єктивів (рисунок 3.7).

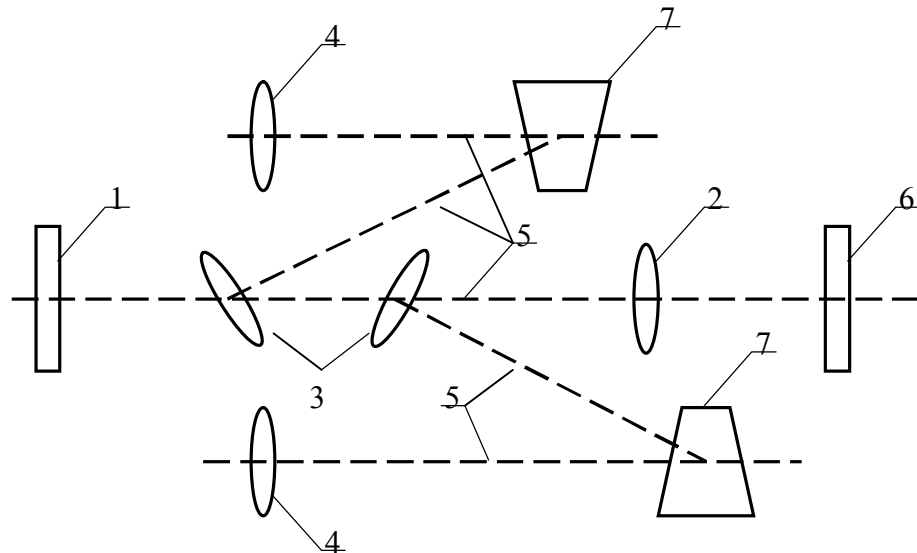
### 3.2 Освітлення об'єкта

Для отримання якісно освітленого об'єкта використовують мінімум три джерела світла (рисунок 3.8) : фонове, модулююче та малююче джерело.



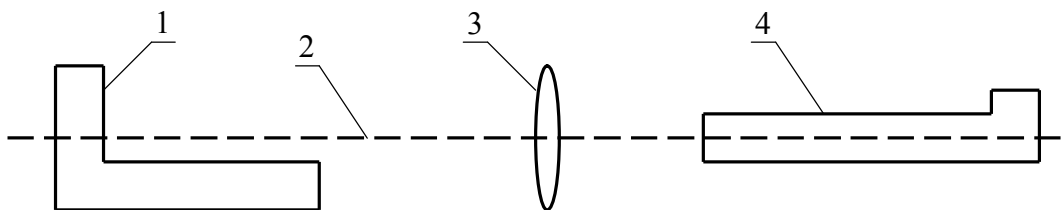
1 – об'єкт, 2 – оптичні осі лінз,  
 3 – вертикальна фронтальна лінза, 4 – нахилені фронтальні лінзи, 5 – факсимільне зображення об'єкта,  
 6 – спотворені зображення об'єктів

Рисунок 3.5 – Вплив нахилу фронтальної лінзи на формоване зображення



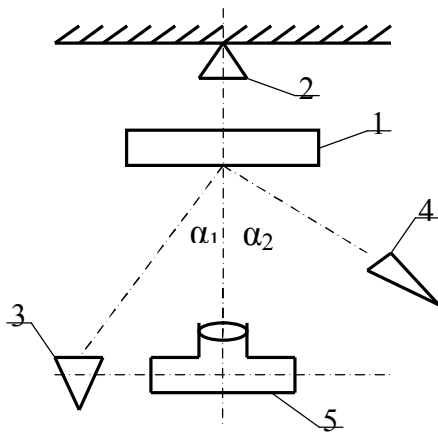
1 – об'єкт, 2 – вертикальна фронтальна лінза, 3 – нахилені фронтальні лінзи, 4 – лінзи, розташовані вище або нижче оптичного центру об'єкта,  
 5 – оптичні осі лінз, 6 – факсимільне зображення об'єкта, 7 – спотворені зображення об'єктів

Рисунок 3.6 – Вплив положення і нахилу лінзи на поперечний переріз об'єкта



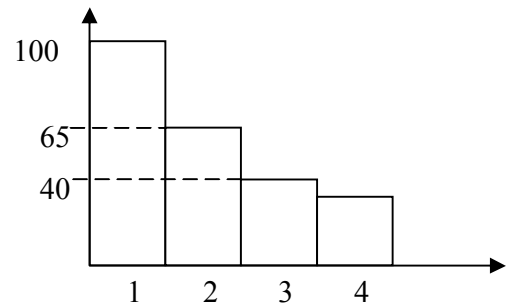
1 – об'єкт, 2 – оптична вісь, 3 – лінза, 4 – зображення об'єкта

Рисунок 3.7 — Спотворення подовжніх розмірів об'єкта



1 – об'єкт, 2 – фонове джерело світла, 3 – модулююче джерело світла, 4 – малююче джерело світла, 5 – фотокамера,  
 $\alpha_1 = 5 \div 10^\circ$ ;  $\alpha_2 = 15 \div 45^\circ$

Рисунок 3.8 – Освітлення об'єкта



1 – людське око, 2 – чорно-біла фотографія, 3 – кольорова фотографія  
 4 – цифрова камера

Рисунок 3.9 – Схема, що ілюструє рівень сприйняття світла різними приладами

Фонове джерело відділяє зображення предмета від фону та призначене для отримання на фотографії чітких зовнішніх контурів предмета.

Модулююче, так само як і малююче джерела призначені для освітлення об'єкта в мірі, достатній для отримання якісної проекції на світлочутливому шарі. Крім того, малююче - призначено для формування тіньової картини від рельєфу об'єкта з метою підвищення чіткості і контрастності.

На рисунку 3.9 представлена схема, що ілюструє рівень сприйняття світла різними фото-приладами порівняно з оком людини. Як можна бачити з цієї схеми, найвищий рівень сприйняття має око людини, оскільки воно може не просто розрізнити кольори і відтінки, але і створювати в мозку людини об'ємну картинку з правильним масштабуванням. Фотоапарати, навіть цифрові, не дають повної картини, особливо, якщо потрібно зробити кількісні і масштабні порівняння розмірів об'єктів, зображених на знімку.

### 3.3 Вибір фотографічного устаткування і матеріалів

Основним вузлом фотографічного пристрою є об'єктив. Залежно від фокусної відстані об'єктиви розділяються на:

1) Короткофокусні з фокусною відстанню менше 35 мм:

- забезпечують великий кут огляду;
- мають велику глибину фокусу.

Такі об'єктиви називають також надширококутними. Вони дозволяють, наприклад, сфотографувати висотну будівлю, навіть не відходячи від неї на значну відстань. Недолік – спотворення об'єкта особливо при неправильному розташуванні об'єктива.

2) Середньофокусні об'єктиви з фокусною відстанню 35 ÷ 80 мм. Це найчастіше використовувані об'єктиви. Їх кут огляду менший, а при погляді через відеошукач видно, що він дещо «наближає» зображення в порівнянні з короткофокусними об'єктивами.

3) Довгофокусні об'єктиви з фокусною відстанню, яка може бути збільшена в принципі до безкінечності (60 мм ÷ декілька метрів). Переваги:

- забезпечують сильне збільшення об'єкта;
- у меншій мірі спотворюють його форму.

Недолік - малий кут огляду.

4) Об'єктиви зі змінною фокусною відстанню, зазвичай 35 ÷ 100 мм.

Таким чином, чим більше фокусна відстань об'єктива, тим вужче його «кут огляду» і тим сильніше він «наближає» об'єкти. Чим менше фокусна відстань, тим ширше «кут огляду», тим дрібніше предмети.

Оскільки лінзові системи завжди мають сферичну і хроматичну аберації, то фотооб'єктиви включають, окрім основної (фронтальної) лінзи, до 10 - 15 двоопуклих і опуклих лінз, що коригують. Окрім лінз об'єктиви завжди включають апертурну діафрагму. Апертурна діафрагма визначає глибину різкості об'єктива і регулює світловий потік, що потрапляє на фотоемульсію.

Глибина різкості - це відстань у напрямі зйомки, на якій не відбувається разфокусування зображення. Чим менше діаметр апертурної діафрагми, тим більше глибина різкості об'єктива.

Вибір експозиції. Оскільки чутливість фотографічних матеріалів обмежена, то для отримання якісного зображення повинен строго обмежуватися світловий потік, що потрапляє на світлочутливий шар. Це обмеження називається експозицією і залежить від величини апертурної діафрагми і часу відкриття затворів (витримки).

Використання світлофільтрів і фотографічних насадок. Джерела світла ділять на природні і штучні. Природне світло (сонячне освітлення) має різний спектральний склад залежно від положення сонця над горизонтом. Так, при низькому положенні сонця у світлі переважає червона частина спектру. Сонячне випромінювання може бути прямим і розсіяним.

Штучне освітлення робиться за допомогою ламп розжарювання, люмінесцентних ламп денного світла, розрядних ламп і імпульсних джерел світла. Найбільш близьким до природного за спектральним складом являється світло люмінесцентних, розрядних і імпульсних ламп. Чорно-білі фотографічні емульсії найбільш чутливі до жовто-зеленої частини спектру. Багатоколірні емульсії мають різну чутливість до світлового випромінювання.

Для адаптації спектрального складу освітлення і спектральної чутливості фотоматеріалів використовують світлофільтри. За допомогою світлофільтрів при чорно-білому фотографуванні можна істотно змінити спектральний склад джерела світла.

Застосування жовто-зелених світлофільтрів підвищує контрастність зображення. Використання червоних світлофільтрів притемняє ділянки об'єкта, що мають синьо-блакитний колір. Сині світлофільтри застосовують для затемнення оранжево-червоних ділянок об'єкта.

## **4 МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ**

### **4.1 Проби на щільність**

Зварювання широко застосовується для виготовлення різних резервуарів для зберігання рідин і газів, а так само для трубопроводів і балонів. Для визначення щільності зварних з'єднань застосовують випробування гідравлічним тиском і повітряною пробою. При повітряній пробі у випробовувану посудину закачується повітря з надмірним тиском 10-20 кН/м<sup>2</sup>, а зовнішня поверхня шва змочується мильною водою. За наявності несущільностей в цих місцях утворюються мильні бульбашки.

У разі ж зварених деталей великих розмірів щільність швів перевіряється обдуванням їх струменем стислого повітря з тиском не менше 0,4 - 0,5 МН/м<sup>2</sup> і



відстанню від кінця шланга до випробовуваного шва не більше 30 мм, протилежна сторона змочується мильною піною.

Газова проба. Оскільки газ має високу змочуваність, він легко проникає в найдрібніші тріщини і при перевірці щільності зварного шва одна сторона шва намазується крейдою, а протилежна сторона змочується газом. У місцях несучільності крейда темніє від газу, що проник.

Аміачна проба. Резервуар заповнюється стислим повітрям з додаванням аміаку (1 - 2%), а зовні на шов наклеюється паперова стрічка, просочена азотнокислою ртуттю або фенолфталеїном. За наявності течі на папері утворюються темні або фіолетові плями.

Вакуумний спосіб. Зварний шов змочується мильною водою і накривається прозорим ковпаком, ущільненим за допомогою гумового прокладення. Потім з ковпака відкачується повітря і в місцях несучільностей утворюються мильні бульбашки, які видно через прозорий ковпак.

За допомогою течошукачів. У випробовувану посудину закачується під невеликим тиском стисле повітря з додаванням галогенів (наприклад,  $CCl_4$ ), а зварний шов промацується за допомогою течошукача, який реагує на наявність галогенів. За наявності (виявленні) галогенів в повітрі і в місцях несучільностей течошукач видає звукові сигнали або змінюються свідчення стрілочного індикатора.

Дослідження за допомогою мас-спектрометра. Воно полягає в тому, що у випробовувану посудину під тиском закачується водень, а зовні за допомогою щупа беруться проби повітря, які і аналізуються за допомогою мас-спектрометра на наявність водню. Водень завдяки малому атомному радіусу здатний проникати через несучільності розмірами декілька нм.

## **4.2 Методи випробувань зварних з'єднань**

Механічні випробування. Їм піддаються як окремі фрагменти зварених конструкцій, так і ціла конструкція з додатком статичних і вібраційних навантажень і ударних навантажень.

Металографічні методи дослідження. Застосовуються методи макро- і мікроструктурного аналізу. Металографічні дослідження дають якнайповніші уявлення про якість зварного з'єднання. Окрім відомих дефектів металографічні випробування дозволяють побачити структурні зміни в зварному шві і в зоні шва, і визначити їх вплив на властивості металу.

Хімічні методи дослідження. При хімічному дослідженні проводиться визначення хімічного складу металу навару і в деяких випадках здійснюються випробування на корозійну стійкість зварного шва.

Фізичні методи дослідження:

Рентгенівські методи, або дослідження з допомогою гамма випромінювання. За допомогою рентгенівських променів (рентгенівської трубки) можна просвічувати метали з товщиною стінок  $50 \div 100$  мм.

З допомогою гамма випромінювання радіоактивних ізотопів (Со та ін.) можна просвічувати метали завтовшки до 400 мм.

Магнітні методи. Ці методи зазвичай використовують для деталей після механічної обробки зварного шва.

Метод магнітного порошку полягає в тому, що на штучно намагнічену поверхню деталей насипають магнітний порошок і навпроти дефектних місць порошки утворюють картину, відмінну від місць, не уражених дефектами.

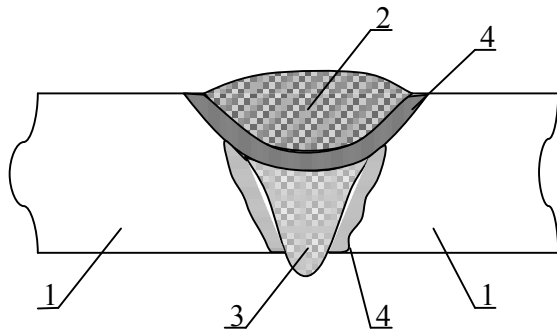
Індукційний метод полягає в тому, що на деталь впливають електромагнітним полем, яке живиться змінним струмом, а з протилежного боку переміщається шукач, який є магнітною котушкою, сигнал від якої через підсилювач подається на стрілочний прилад або навушники. У разі суцільного шва звучання в навушниках буде монотонним, а в дефектних місцях звучання переривчасте.

Ультразвукова дефектоскопія. Цей метод заснований на тому, що ультразвуковий генератор за допомогою випромінювача подає сигнал в зону зварного шва, який здатний відбиватися від поверхні і уловлюватися приладом з електронно-променевою трубкою. За допомогою цього приладу можна визначити розміри дефекту і його місце розташування. Нині промисловістю випускаються дефектоскопи, які малюють на екрані об'ємне зображення зварного шва з дефектами.

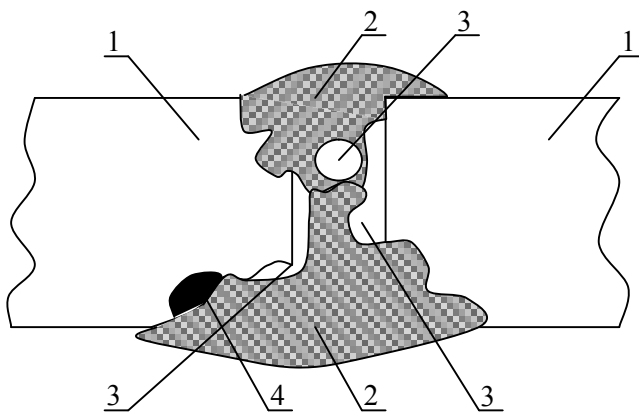
### **4.3 Аналіз структури зварного шва**

На рисунку 4.1 представлена схема зварного шва без дефектів. Судячи із структури, першим варився шов 3, а потім варився шов 2. Якість цього зварного шва можна вважати хорошою, його єдиний недолік - це наявність зони термічного впливу, який можна усунути за допомогою відпалу усього виробу, якщо це можливо або за допомогою відпалу зварної зони. Проте на практиці

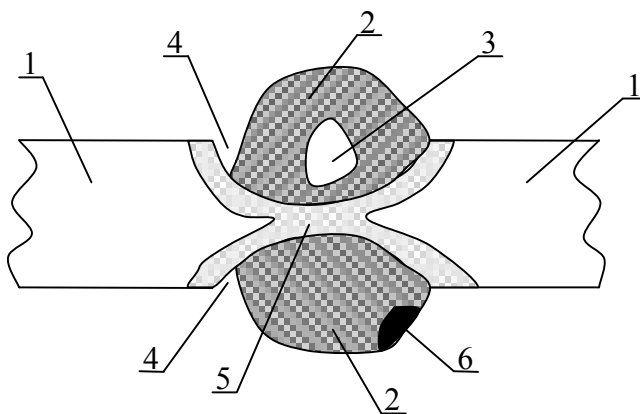
ідеальні зварні шви зустрічаються не завжди. Так, на рисунках 4.2 і 4.3 показані схеми зварних швів з різними дефектами.



1 – основний метал,  
2,3 – наварний метал,  
4 – зона термічного впливу  
Рисунок 4.1 – Схема зварного шва без дефектів



1 – основний метал,  
2 – наварний метал,  
3 – непроварення,  
4 – шлакове включення  
Рисунок 4.2 – Зварний шов з дефектами



1 – основний метал,  
2 – наварний метал,  
3 – непроварення, 4 – підрізи,  
5 – зони термічного впливу,  
6 – шлакове включення  
Рисунок 4.3 – Зварний шов з дефектами

Наявність непроварення в зварному з'єднанні і наявність неплавлення кромки основного металу призводить до різкого зниження міцності зварного шва. Ймовірно зварювання проводилося слабким струмом (кромки основного металу частково не розплавлені).

Із-за наявності підрізів основного металу внизу і вгорі зменшений переріз основного металу, що не допустимо. Якість зварного шва незадовільна. Цей дефект (підрізи) можна виправити додатковим зварюванням. Зварювання велося великим струмом, необхідно змінити режим зварювання.

Нині зварюванням все частіше сполучають різні марки сталей. Розглянемо такий випадок на наступному прикладі.

Приклад. Проводилося стикове зварювання, після якого був проведений відпал для поліпшення якості зварного з'єднання дифузійним методом (рисунок 4.4). В процесі відпалу в зварюваних деталях стався перерозподіл вуглецю. Необхідно відповісти на питання: в яку сторону перемістився вуглець?

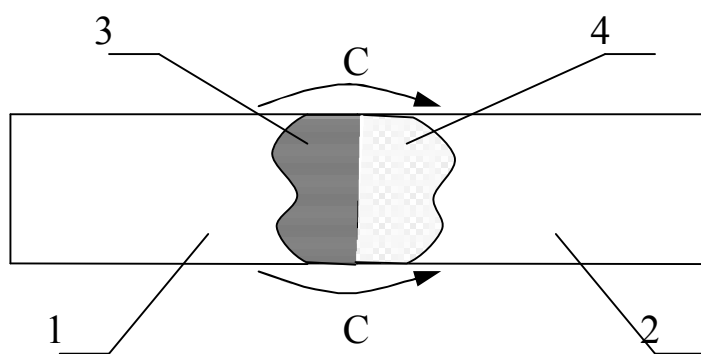
Відомий закон Фіка :  $\dot{I} = -D \frac{dc}{dx}$ , де:

D – коефіцієнт дифузії;

c – концентрація атомів речовини в одиниці об'єму;

x – мінімальна відстань, на яку переміщуються атоми речовини.

Згідно із законом Фіка і по логіці, вуглець повинен би був переміщатися від більшого змісту до меншого, а сталося навпаки.



- 1 – сталь з 2% Si і 0,4% C,
- 2 – сталь з 3% Cr і 0,8% C,
- 3 – знеуглецьований шар,
- 4 – шар з підвищеним вмістом вуглецю

Рисунок 4.4 – Схема переміщення вуглецю в зварному шві

Це пов'язано з тим, що кремній, що знаходиться в першій сталі, підвищує активність вуглецю, тобто як би виштовхує його з твердого розчину, а в другій сталі карбідоутворюючий хром знижує хімічний потенціал вуглецю. Таким чином, вуглець із сталі 1 йтиме в сталь 2, на межі утворюється знеуглецьована зона в сталі 1 і з підвищеним вмістом в сталі 2.

#### 4.4 Загальні положення для оцінки структур зварних з'єднань

*Первинна кристалізація.*

Під первинною кристалізацією розуміють ріст кристалітів з розплаву при твердінні зварювальної ванни. В результаті утворюється так звана первинна

структура. У таких металів, як алюміній, мідь, нікель і їх сплави, при подальшому охолодженні первинна структура не змінюється або змінюється трохи. Тому від неї залежать властивості зварного шва. Для визначення первинної структури необхідно знати умови її утворення і чинники, що впливають на неї.

У металів і сплавів з алотропічними (поліморфними) модифікаціями, наприклад у сталей, в процесі охолодження в твердому стані протікає вторинна кристалізація або перекристалізація. В цьому випадку властивості вторинної структури визначаються модифікаціями, стабільними при нижчих температурах.

Існує певний зв'язок між первинною і вторинною структурами, тому потрібні дослідження первинної структури і у сплавів з алотропічними перетвореннями. Крім того, первинна структура перед перекристалізацією зазнає дії навантажень, наприклад, усадкової напруги. Тріщини, що утворюються в зварних швах, не можуть бути пояснені вторинною кристалізацією. Тому для металографічних досліджень важливо мати уявлення про процеси первинної кристалізації.

При кристалізації металевих розплавів розрізняють переохолодження розплаву, утворення зародків і ріст зародків.

Без переохолодження кристалізація неможлива. Переохолодження може бути термічним або концентраційним. Термічне переохолодження технічно чистих металів має значення тільки при утворенні зародків. Проте в зварних швах завжди є вже готові центри кристалізації. Тому внаслідок зменшення енергії утворення зародка необхідне переохолодження може бути меншим або необхідність в нім може бути відсутньою. На особливу увагу в цьому відношенні заслуговують кристали основного металу, що не розплавився, на яких може відбуватися епітаксіальна кристалізація з рідкої фази, тобто з тією ж кристаліграфічною орієнтацією.

Ріст зародків кристалізації пов'язаний з концентраційним переохолодженням. Воно розвивається тільки в сплавах або в сильно забруднених металах. Розплав кристалізується в деякому інтервалі температур, а легуючі елементи або домішки знижують температуру ліквідуса. Вони накопичуються перед фронтом кристалізації і знижують температуру ліквідуса ще більшою мірою (рисунок 4.5).

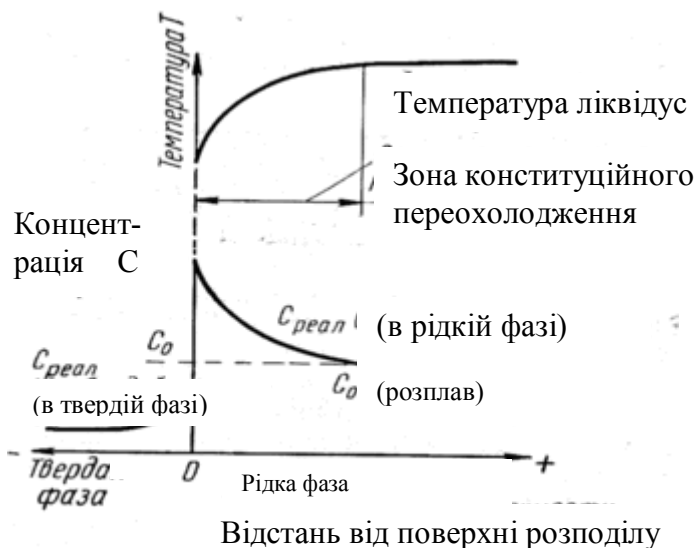


Рисунок 4.5 – Схема концентраційного переохолодження

Цей ефект підвищується зі збільшенням швидкості кристалізації. Сприятливі умови в цьому відношенні створюються при електрошлаковому зварюванні (малі температурні градієнти) і при контактному точковому зварюванні (висока швидкість кристалізації).

Відповідно до об'ємного розподілу градієнтів температур і швидкостей кристалізації в зварному шві безперервно зростає концентраційне переохолодження від межі сплавлення до середини шва. У цій зоні виникає найбільша вірогідність утворення зародків кристалізації, внаслідок чого за певних умов в середині зварного шва внаслідок концентраційного переохолодження може виникнути другий фронт кристалізації.

Перший фронт кристалізації виникає в результаті росту кристалів від частково оплавлених зерен основного металу, що граничить із зварювальною ванною і грає роль готових центрів (рисунок 4.6).

Найшвидше вони ростуть перпендикулярно до ізотермічних граничних поверхонь і паралельно напрямів найбільш інтенсивного тепловідводу. В результаті утворюються орієнтовані стовпчасті кристали. Кристаліти другого фронту кристалізації, що утворюються із зародків кристалізації в результаті концентраційного переохолодження, мають, навпаки, рівноосну будова (рисунок 4.7).

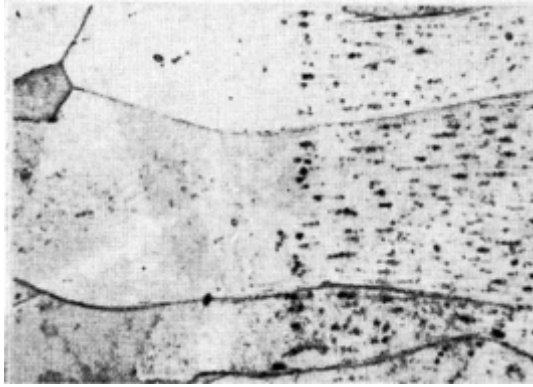


Рисунок 4.6 – Епітаксіальний ріст зерен основного металу на першому фронті кристалізації шва міді, виконаного плазмовим зварюванням

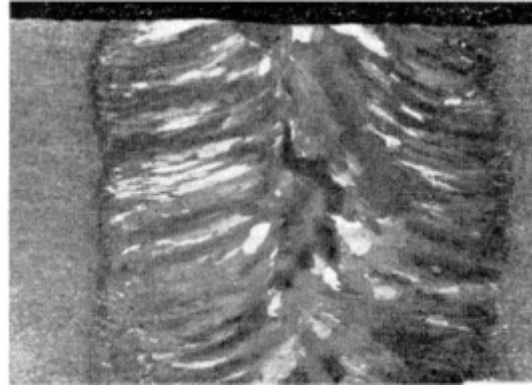


Рисунок 4.7 – Фронт кристалізації з глобулярними разорієнтованими кристалами усередині зварного шва сплаву, виконаного вольфрамовим електродом в аргоні

Концентраційне переохолодження грає також певну роль при утворенні кристалів на першому фронті кристалізації. Чисті метали утворюють (особливо при великій швидкості твердіння і малих температурних градієнтах) кристали, які з бічної поверхні обмежені порівняно плоскими поверхнями. Такий ріст кристалів називається комірчастим (рисунок 4.8).

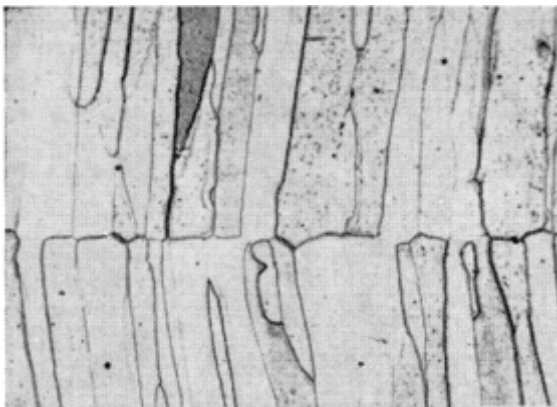


Рисунок 4.8 - Комірчаста кристалізація зварного шва вольфраму, виконаного контактним точковим зварюванням

Навпаки, при малих швидкостях охолодження і великих температурних градієнтах, а також при підвищеному вмісті домішок, що ліквірують (що розподіляються нерівномірно) граничні поверхні кристалів відрізняються значними нерівностями: ріст кристалітів набуває дендритного характеру.

Вершини зростаючих кристалітів проростають в зону концентраційного переохолодження (рисунок 4.9)

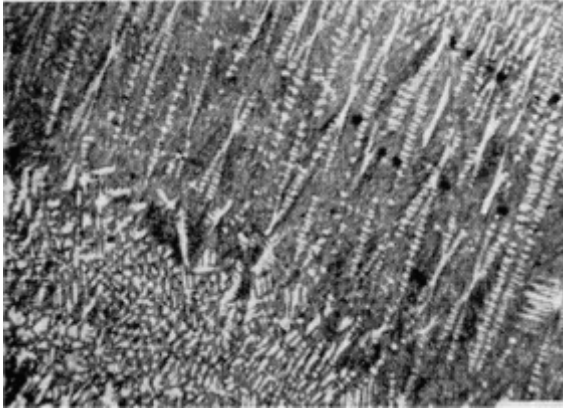


Рисунок 4.9 – Дендрит зварного шва залізохромборвуглецевого сплаву в перерізі, паралельному їх подовжнім осям

Проте по шліфу не можна точно визначити напрям кристалів зварного шва. Тому в мікроструктурі зварних швів, що не зазнають алотропічних перетворень, виявляються межі комірчастих дендритних кристалів зазвичай у вигляді більш менш впорядкованої сітки (рисунки 4.10 і 4.11).

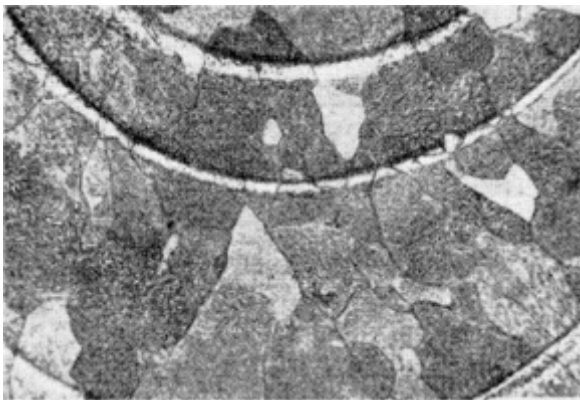


Рисунок 4.10 – Комірчасті кристали зварного шва в перерізі, не паралельному їх подовжнім осям (зерниста структура).

Електроннопроменеве зварювання міді

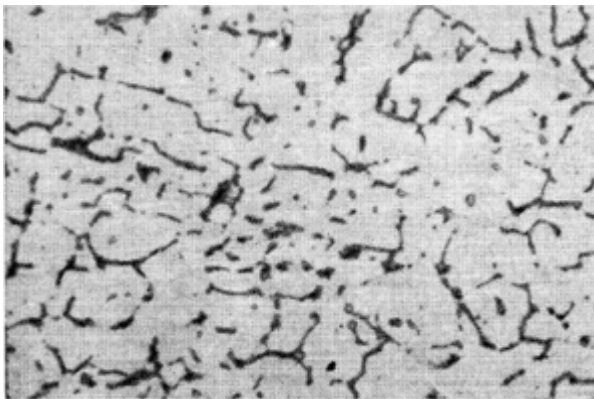


Рисунок 4.11 – Дендрит в перерізі, не паралельному їх подовжнім осям (комірчаста структура). Зварювання аустенітної хромонікелевої сталі плавким електродом в аргоні

Якщо утворюється дендрит, то площини перерізів розгалужень однакових кристалітів не можна відрізнити один від одного. В цьому випадку перерізи розгалужень (рис. 4.10) називають осередками. Перерізи кристалів (рис. 4.11), що комірчастий кристалізуються, називають «зернистою структурою» (на відміну від перших вони утворюють замкнуту сітку).



При сприятливих обставинах можна і по вторинній структурі сплавів, що зазнають алотропічні перетворення, зробити висновок про будову первинних кристалів. Прикладами можуть служити одношарові шви конструкційних сталей. При перекристалізації металу цих швів по межах первинних зерен утворюється доевтектоїдний ферит, що виразно виявляється при травленні.

Спрямованість кристалів першого фронту кристалізації по відношенню до подовжньої осі шва залежить від швидкості зварювання і швидкості твердіння. У швах, отриманих при малих швидкостях зварювання і твердіння, кристаліти розташовані майже паралельно осі шва і утворюють дендрит. Велика швидкість зварювання веде до зміни схеми кристалізації (рисунки 4.12 і 4.13).

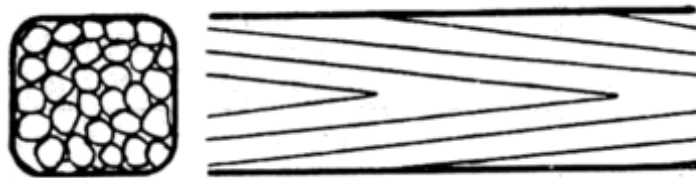


Рисунок 4.12 – Положення кристалів в швах при малих швидкостях зварювання і твердінні.

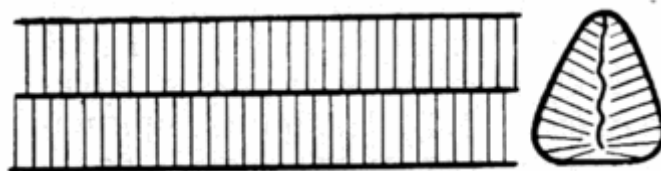


Рисунок 4.13 – Положення кристалів при великій швидкості зварювання

Особливим випадком є утворення «п'р'ястих» кристалів в швах алюмінію і його сплавів. Мала швидкість зварювання з великою погонною енергією веде до утворення великих, а велика швидкість з малою за об'ємом зварювальною ванною - до утворення дрібних первинних кристалів.

Розмір осередків первинної структури зварного шва є істотною ознакою, що визначає властивості міцності. У сталей цей показник внаслідок алотропічних перетворень має другорядне значення. Проте і вторинна структура має тим більше дрібне зерно, чим менше первинне зерно. Зазвичай прагнуть до отримання можливо більш дрібнозернистої (чи дрібнокомірчастої) разорієнтованої структури.

## **5 ОСНОВИ МЕТОДИКИ ВСТАНОВЛЕННЯ ПРИЧИН РУЙНУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ**

Як вже відзначалося, аналіз зламів є лише одним з основних етапів робіт, що проводяться для виявлення причин руйнування деталей.

Іншими, не менш важливими етапами робіт є: оцінка ушкоджень на зв'язаних або близьких до аварійної деталях для встановлення послідовності руйнування і ненормальностей в роботі машини або механізму до аварії або виходу з ладу, дефектоскопування деталі і дослідження якості матеріалу. Для встановлення причин руйнування іноді необхідно обстежувати стан аналогічних машин, або механізмів, що не зруйнувалися, зібрати статистичні дані по дефектах, натурних випробуваннях, ознайомитися з розрахунками міцності деталей і результатами досліджень, що раніше проводилися, по аналогічних поломках і т. д.

Зміст і об'єм конкретних робіт залежать від характеру аварії, виду деталі, галузі техніки і умов експлуатації. Оскільки виклад методики встановлення причин руйнування деталей виходить за рамки даного посібника, обмежимося тільки основними положеннями.

План дослідження для встановлення причин поломок деталей складається з наступних 5 основних етапів:

- 1) оцінка загального стану об'єкта дослідження;
- 2) аналіз зовнішнього стану зруйнованих, пошкоджених або зв'язаних з ними деталей;
- 3) оцінка якості виготовлення і матеріалу деталі шляхом огляду, дефектоскопування, металографічних, механічних і інших досліджень;
- 4) аналіз умов роботи шляхом оцінки зовнішнього стану деталей, спостереження за роботою конструкції, машини або механізму до її поломки, натурних, стендових, експлуатаційних і спеціальних випробувань, розрахунків на міцність, експериментальних методів оцінки напруг і т. д.;
- 5) узагальнення і аналіз результатів досліджень і розробка рекомендацій по попередженню причин, що викликають подібні поломки.

Зупинимося детальніше на методиці проведення кожного етапу дослідження окремо.

## 5.1 Оцінка загального стану об'єкта дослідження

Роботи по встановленню причин поломок деталей починаються на місці виявлення поломки, а закінчуються зазвичай в лабораторних умовах і часто не тими особами, які їх починали. Тому для розмежування робіт, що проводяться на місці поломки від лабораторного *дослідження*, ці роботи називаються *розслідуванням*.

Від ретельності і повноти розслідування багато в чому залежить правильність встановлення причин поломки деталі при дослідженні.

Розслідування включає загальний огляд об'єкта дослідження з метою виявлення наявних руйнувань і ушкоджень окремих деталей, вузлів і усієї конструкції або машини в цілому, вивчення обставин їх руйнування або ушкодження і зовнішніх ознак, якими воно супроводжувалося.

Ушкодження або поломка можуть супроводжуватися явними руйнуваннями або проявлятися побічно у вигляді вібрації, диму, течі і так далі.

Розслідування розпочинається з опитування обслуговуючих працівників, технічного складу або випадкових свідків, що виявили аварію або дефект, вивчення усіх обставин, при яких сталося порушення нормальної роботи і зовнішніх ознак, якими воно супроводжувалося. Сюди відносяться: загальна тривалість і режим роботи, характер відхилення від нормального режиму. Так, руйнування кільця підшипника автомобіля, показаного на рисунку 5.1, сталося внаслідок вібрації пола гаража, яка була викликана роботою близько розташованого двотактного двигуна.

Для отримання повнішого уявлення про характер дефекту, який привів до відмови в роботі машини, у тому випадку, коли це можливо, рекомендується зробити її випробування в роботі. Так, вібрація поршневого двигуна може бути тимчасовою, наприклад, внаслідок «зависання» клапана циліндра в направляючій втулці, але може бути викликана і руйнуванням окремих деталей або відмовою в роботі окремих агрегатів (рис. 5.1).

У разі великої аварії і значного віддалення один від одного окремих уламків необхідно вказати на плані місцевості їх взаємне розташування, місце вибуху, удару або падіння конструкції або машини. По взаємному розташуванню на місцевості уламків літака можна, наприклад, встановити напрям його польоту в процесі падіння, кут падіння, виявити елементи

конструкції, якими літак спочатку торкнувся землі. Мета розслідування - визначити деталь або вузол, що спочатку зруйнувалися, встановити передбачувані причини аварії або дефекту і з максимальною повнотою описати усі обставини події, щоб допомогти визначенню істинних причин поломки при подальшому дослідженні.



Рисунок 5.1 - Вм'ятини на бігових доріжках кілець, що утворилися внаслідок вібрації підшипника

Істотною особливістю цього етапу робіт є те, що результати розслідування не можна повторити або доповнити в процесі подальшого дослідження. Це пов'язано з тим, що машина, вузол або деталь спрямовуються на дослідження, пальне і мастило зливаються, уламки перемішуються, а точність свідчень свідків поломки і обслуговуючого персоналу швидко убивають з часом. Тому від дослідників на першому етапі робіт потрібно відмінне знання матеріальної частини, особливостей її експлуатації, технічного обслуговування і технології виготовлення і ремонту.

Після того, як на місці події встановлені можливі причини появи дефекту і визначено місце первинного руйнування, деталі, їх розташування і усі помічені дефекти, які можуть бути корисними при встановленні причин поломки, фотографують. Про усі помічені ненормальності в роботі матеріальної частини, обставинах поломки встановленої послідовності руйнування і доказах або припущеннях про місце первинної поломки складається детальний опис.

## **5.2 Аналіз зовнішнього стану**

Аналіз зовнішнього стану зруйнованих або пошкоджених деталей повинен розпочинатися з виявлення деталі, що зруйнувалася першою. Після

цього робиться встановлення послідовності руйнування усіх деталей і виявлення місць зародження зламів і концентраторів напруги. Концентратори напруги оцінюють по їх формі і будові зламу. Велике значення має встановлення діючих навантажень, ступеня перевантаження при повторних навантаженнях і виявлення ненормальностей в роботі деталі, що зруйнувалася. Про ці ненормальності часто можна судити по взаємних ушкодженнях деталей.

Дослідження взаємних ушкоджень дозволяє охарактеризувати предмет, що ударив, - його форму, швидкість і напрям руху. Правильна оцінка взаємних ушкоджень іноді дозволяє встановити причину поломки без проведення будь-яких додаткових досліджень.

Так, якщо відбувається уповільнене крихке руйнування болтів і інших деталей, по наявності слідів нерівномірного торкання можна встановити перекис при роботі болта або шпильки.

Для правильної оцінки взаємних ушкоджень (потертостей, вм'ятин), необхідно хоч би приблизно встановити час утворення цих дефектів в процесі роботи або руйнування деталей. У тому випадку, коли за характером взаємних ушкоджень видно, що вони утворилися до поломки деталей, можна робити висновок, що такі ушкодження могли сприяти руйнуванню деталі. Іноді можна встановити, що ушкодження сталося в процесі руйнування деталей і пов'язано з порушенням нормальних умов роботи.

При визначенні деталі, що спочатку зруйнувалася, необхідно усі ушкодження, наявні на деталях, розділити на дві групи, залежно від їх походження.

До першої групи відносяться усі ушкодження, що виникли в процесі руйнування. Аналіз цих ушкоджень, виконаний з урахуванням особливостей кінематики вузла і умов навантаження деталей, дозволяє визначити послідовність руйнування деталей і деталей, що зруйнувалася першою.

До другої групи відносяться ушкодження, що виникли в процесі праці машини або механізму до поломки. Наприклад, надмірний знос, виробітки, потертості, сліди сильної корозії, корозії сухого тертя і т. д. Ці ушкодження у ряді випадків можуть вказати на порушення нормальних умов роботи деталі, а встановлення їх зв'язку з поломкою грає в таких випадках істотну роль при встановленні причин руйнування.

Доцільність подібного ділення ушкоджень на дві групи очевидна і не вимагає яких-небудь додаткових пояснень. Дійсно, дослідження зруйнованих

деталей показує, що при визначенні деталі, що спочатку зруйнувалася, найбільші утруднення виникають у разі руйнування деталей, що швидко рухаються та кінематично пов'язаних.

Так, спільне руйнування поршня, шатуна і поршневого пальця двигуна внутрішнього згорання може початися з будь-якою з цих трьох деталей. У разі руйнування поршня звільнений від нього поршневий палець наносить на робочій поверхні гільзи циліндра характерні подовжні смуги. Руйнування поршневого пальця супроводжується інтенсивною розробкою отворів у бобишках поршня і шатуні. Якщо ж першим зруйнувався шатун, то поршень, що відокремився від нього, може бути пошкоджений деталями колінчастого вала, що обертаються. Отже, в даному випадку подовжні смуги, розробка отворів або сліди того, що зім'яло поршень противагами колінчастого вала, вказують на первинне руйнування однієї з цих трьох деталей.

Ознаки первинного руйнування деталей можуть бути дуже різноманітними і тому не можна дати загальних рекомендацій що до виявлення таких деталей. В усякому разі, наявність втомного зламу у більшості випадків може служити достатнім доказом первинного руйнування деталі. Ділянка первинного руйнування деталі виявляється по будові зламів, а у разі значного ушкодження зламу, - за непрямыми ознаками, наприклад, по мірі деформації окремих уламків, по мірі руйнування деталі на різних ділянках, по інтенсивності нагаровідкладень і т. п.

В якості прикладу на рисунку 5.2 показаний зруйнований по двох перерізах (стержню і голівці) причіпний шатун поршневого двигуна.

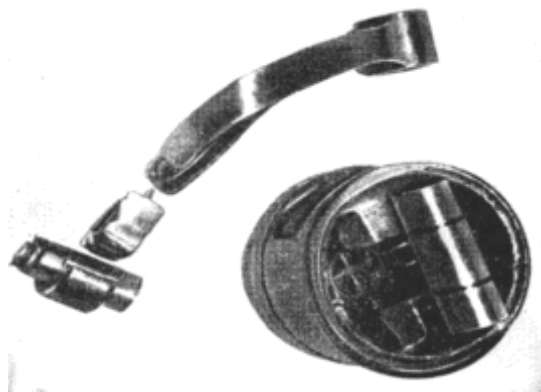


Рисунок 5.2 - Причіпний шатун двигуна, що зруйнувався по двох перерізах

Попри те, що злами сильно забиті, все ж можна визначити місце первинного руйнування. Аналіз умов роботи шатуна показує, що його первинне

руйнування могло статися тільки по голівці, оскільки після обриву стержня шатуна зникає сила, що розтягує шатун, від якої міг піти розрив голівки.

У інших випадках визначити місце первинного руйнування допомагає виявлення поблизу місця зародження зламу різних зовнішніх ознак у вигляді дефектів матеріалу, слідів ненормальних вироблень, що свідчать про роботу машини з деталлю, що ламається, характерного місцевого зминання країв зламу, слідів залишкової деформації.

Виявлення і оцінка концентратора напруги робиться за зломом або за непрямыми ознаками. Концентратор напруги, що послужив осередком зародження зламу, розташовується на ділянці первинного руйнування. У тих випадках, коли злам сильно пошкоджений, концентратор напруги може бути встановлений шляхом металографічного аналізу, застосуванням методу дефектоскопії або оцінкою розташування зламу на деталі. Так, виявлення на ділянці первинного руйнування металургійних дефектів (шліфувальних тріщин), може стати доказом того, що руйнування деталі почалося від цих концентраторів напруги. Поверхня зламу пружини, нахилена не під кутом  $45^\circ$  до її витка, а з подовжнім розщеплюванням, свідчить про руйнування пружини по подовжньому дефекту (рисці, волосовині) або внаслідок різко зниженої міцності упоперек волокна.

Не можна прагнути в обов'язковому порядку знаходити концентратор напруги, оскільки поломка може бути наслідком загальної підвищеної напруженості деталі або зниження міцності і пластичності в результаті впливу середовища, температури і т. д. Оцінюється концентратор напруги по зломі, розрахунковим шляхом, методами тензометрування, або натурних випробувань, а також зіставленням характеру руйнувань і термінів служби однотипних деталей.

Характер руйнування оцінюється по розташуванню поверхні зламу відносно діючих сил і зовнішніх контурів деталі. Так, наприклад, якщо поверхня зламу колінчастого вала розташовується під кутом  $45^\circ$  до його осі, то руйнування пішло від змінного кручення. Якщо злам колінчастого вала стався під кутом близьким до  $90^\circ$ , то руйнування його виникло від одноразового або повторного кручення при значних перевантаженнях, а також від повторних навантажень, що вигинають.

При оцінці характеру діючих сил необхідно враховувати умови навантаження деталі. Розташування поверхні зламу по відношенню осі вала визначається величиною перевантаження і впливом концентратора напруги.

При дуже великому перевантаженні вала крутильними коливаннями або одноразовому його скручуванні, як наприклад, при миттєвій зупинці двигуна утворюється злам майже перпендикулярно до осі вала. Також і за наявності різкого концентратора напруги, розташованого перпендикулярно до осі вала (різьблення, гостра виточка) злам зароджується по поверхні, перпендикулярній до осі вала. При подальшому розвитку, частіше при невеликому перевантаженні і не дуже різкому концентраторі напруги, тріщина втомі зазвичай переходить в спіральну. Злам вала під кутом  $45^\circ$  або першопричинне утворення подовжніх тріщин спостерігається при відносно невеликому циклічному перевантаженні. Злам стержнів, шпильок, труб, тяги від вигину або розтягування відбувається по площині, перпендикулярній до осі. Без аналізу умов вантаження деталі і її роботи в цьому випадку важко встановити, від яких навантажень пішов злам.

Перевантаження деталі при повторному вантаженні можна оцінювати по аналізу зламу, шляхом перевірного розрахунку на міцність, випробувань або експериментальної оцінки напруги. Для визначення характеру діючих навантажень при утомному руйнуванні наведена орієнтовна таблиця будови зламів (таблиця 5.1).




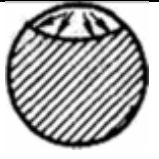
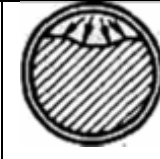
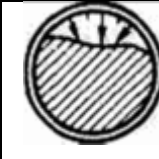



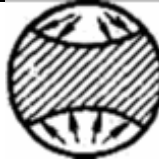
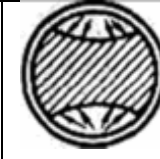




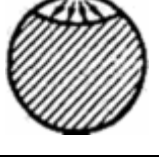

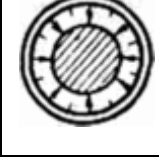
### **5.3 Оцінка якості виготовлення і матеріалу деталі**

На цьому етапі дослідження роблять:

- 1) вимір деталей з метою встановлення їх відповідності вимогам технічних умов;
- 2) оцінку якості обробки поверхні;
- 3) дослідження методом дефектоскопії для виявлення тріщин і металургійних дефектів;
- 4) перевірку якості матеріалу для встановлення відповідності механічних властивостей вимогам, що пред'являються, і для виявлення металургійних дефектів матеріалу.



Таблиця 5.1 - Орієнтовна таблиця будови зламів

Вид вантаження	Низька номінальна напруга			Висока номінальна напруга		
	Слабкий локальний концентратор	Слабкий концентратор по окружності	Сильний концентратор по окружності	Слабкий локальний концентратор	Слабкий концентратор по окружності	Сильний концентратор по окружності
Розтягування і односторонній вигин						
Двусторонній вигин						
Вигин при обертанні						

Обмір включає не лише вимір окремих деталей, але і перевірку регулювальних проміжків в процесі розбирання. Тому обмір починається при розбиранні вузла, тобто ще на першому етапі дослідження. Значення перевірки проміжків видно з наступного прикладу. На авіаційному двигуні сталося руйнування грибка клапана впускання. Обмір показав, що регулювальні проміжки між клапаном і штовхальником збільшені приблизно в 8 разів. Розрахунками і випробуваннями встановлено, що подібне збільшення проміжків призводить до збільшення динамічних навантажень до 3 разів.

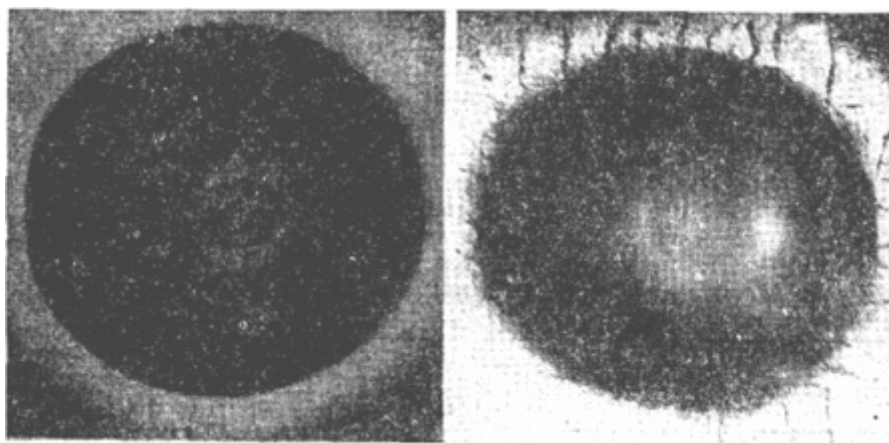
У разі руйнування деталі по конструктивному концентратору напруги вимірюється радіус галтельних переходів калібрами, шляхом зняття зліпків з подальшим їх переглядом на проекторі, вирізкою темплетів. Визначається також клас чистоти обробки поверхні, глибина і гострота поверхневих дефектів, що особливо важливо, якщо руйнування деталі сталося по рисках від механічної обробки, вм'ятинам, корозійним раковинам.

Дефектоскопування деталей, що ламаються, зазвичай проводиться тими ж методами фізичного контролю, які застосовуються при дефектоскопуванні деталей в процесі їх виготовлення або ремонту. Доцільно оглядати деталі візуально, а також за допомогою лупи або біноклярного мікроскопа. Для кращого виявлення тріщин і інших дефектів поверхню деталі у ряді випадків злегка протравлюють.

При дефектоскопуванні особливо ретельно контролюються ділянки, розташовані поблизу зони зародження зламу.

Дослідження якості матеріалу включає стандартні механічні випробування, металографічний і хімічний аналізи, а також різні технологічні і інші проби матеріалу. Ці дослідження робляться стандартними методами, але їх застосування для аварійних деталей має деякі специфічні особливості. У разі неможливості виготовлення стандартних зразків випробування на розтягування, вигин і кручення можна робити на мікромашинах.

При випробуванні на «вигин з перегином» важливіше визначити момент появи перших тріщин, а не кількість повторних вигинів до повного руйнування, як це зазвичай робиться. Випробуванням на подовжню стійкість важливо визначити характер порушення міцності, а не тільки величину критичної сили і т. д. На рисунку 5.3 показані відбитки від втискування сталеві кульки в задовільно і незадовільно хромовані деталі.



а

б

а – метал із задовільним хромуванням, б – метал з незадовільним хромуванням

Рисунок 5.3 – Фотографії відбитків від втискування сталеві кульки

Як видно з рис. 5.3, хромований шар розтріскався при втискуванні тільки на аварійній деталі, що стало одним з доказів дефектності хромового покриття. Для виявлення поверхневих шарів з відмінними від серцевини властивостями (твердістю) доцільно робити вимір мікротвердості на косих шліфах.

#### **5.4 Аналіз умов роботи деталі**

Аналіз умов роботи включає оцінку конструктивних, виробничо-технологічних і експлуатаційних чинників. Оцінка конструктивних чинників обов'язкова у разі масових поломок одних і тих же деталей, а також у разі поломки деталей опитних машин. Поломки деталей внаслідок недостатньої міцності характеризуються, як правило, малим терміном служби.

Іноді недостатня міцність може проявлятися після тільки тривалої роботи, коли збільшується діюча напруга або погіршуються механічні властивості матеріалу, наприклад, внаслідок зносу або при роботі деталі в умовах підвищених температур.

В якості конструктивних недоліків, які можуть призводити до поломок деталей, вкажемо на незадовільну конструкцію вузла, що виражається, наприклад, в призначенні конструктором виточок, зварних швів і т. д. у найбільш навантажених зонах деталі, неправильний підбір матеріалу пар, що труться, незадовільні умови мастила, неправильне призначення проміжків і т. д.

Внаслідок неправильного підбору матеріалу пар, що труться, дотичні поверхні деталей можуть зношуватися, піддаватися корозії тертя. Неправильне призначення проміжків призводить до того, що деталі зачіпають одна за одну або перевантажуються.

Оцінка виробничо-технологічних чинників робиться на підставі результатів обміру і випробувань машин в роботі, перевірки биття, огляду аналогічних деталей, що знаходяться в експлуатації, дослідження матеріалу і іншими способами, що дозволяють виявити дефекти, допущені при виготовленні або при ремонті деталі, машини або механізму. До групи виробничо-технологічних відносяться не лише виробничі дефекти, що виникли при виготовленні деталі, але й ремонтні.

Проте при дослідженні зруйнованих деталей у більшості випадків все ж вдається відрізнити дефекти, що виникли при виготовленні, від ремонтних.

Показовим в цьому відношенні являється термін служби деталі або машини з початку експлуатації і після ремонту. Якщо дефект виник при ремонті, то руйнування зазвичай відбувається незабаром після ремонту.

Узагальнення фактичного матеріалу по аналізу руйнувань деталей машин показує, що виробничо-технологічні причини поломок наступні:

- дефекти матеріалу;
- дефекти термічної і гальванічної обробок;
- дефекти механічної обробки;
- дефекти зборки.

До дефектів механічної обробки відносяться: спотворення геометричної форми деталі при її виготовленні, ушкодження при ремонті, підризи галтельних переходів, сліди грубої механічної обробки, надіри і тріщини, шліфувальні тріщини і опіки та ін.

До групи монтажних дефектів відносяться перекося, неправильна посадка, перетяжка, послаблення затягування різьбових з'єднань і др. Особу групу дефектів складають випадкові дефекти, як наприклад, пропуск деталі в незагартованому стані, ушкодження деталей вм'ятинами і забоїнами, переплутування матеріалів та ін. Оцінка експлуатаційних чинників зазвичай викликає найбільші утруднення внаслідок того, що допущені при експлуатації або обслуговуванні порушення або зміни нормальної роботи машини виявляються насилу, а часто залишаються невиявленими. Можна вказати на добре відомі випадки руйнування шатунів і інших деталей поршневих двигунів, що відбуваються внаслідок гідравлічного удару. Останній викликається тим, що із-за «перезаливки» камери згорання олією або паливом відбувається удар поршнем.

При неуважному спостереженні за роботою двигуна гідравлічний удар може бути і не помічений, і двигун продовжуватиме експлуатуватися з деформованим шатуном. Це призводить до зростання діючої на шатун напруги і до подальшого його втомного руйнування через більш менш тривалий проміжок часу.

Якщо ремонтні і виробничі дефекти у більшості випадків можна встановити прямим шляхом (обмір, дефектоскопування і т. д.), то

експлуатаційні порушення (гідравлічний удар, перегрівання, «масляне голодування» і т. д.) зазвичай встановлюються тільки непрямим шляхом.

Тому при аналізі експлуатаційних чинників важливе значення має вивчення документації по експлуатації і технічному обслуговуванню. При оцінці експлуатаційних чинників слід враховувати кваліфікацію працівників, обслуговуючих машину, термін служби машини, режими роботи, характер поломки машини, а також причини заміни деталей і вузлів. Наведений перелік не є вичерпним і у кожному конкретному випадку повинен уточнюватися і доповнюватися виходячи з особливостей роботи машини.

### **5.5 Узагальнення результатів дослідження**

Остаточний висновок про причини поломки у більшості випадків може бути зроблений тільки після узагальнення усіх результатів дослідження: аналізу зовнішнього стану, умов роботи і зламу деталі, оцінки матеріалу, а в окремих випадках розрахунків на міцність або експериментальної оцінки напруги.

Основним призначенням результатів аналізу матеріалів дослідження є обґрунтування послідовності або картини руйнування деталей і встановлення причини поломки.

На підставі висновків за результатами дослідження і висновку про причину поломки розробляються рекомендації по попередженню подібних поломок надалі. Необхідність розробки рекомендацій або претензій до промисловості, конструктора, ремонтним або експлуатаційним організаціям встановлюється виходячи з поставлених при дослідженні завдань, небезпеки поломки, повторюваності аналогічних поломок і т. д.

Розробка заходів з попередження аналогічних поломок є завершальним етапом дослідження.

Рекомендації по усуненню причин поломок можуть передбачати:

- поліпшення конструкції деталей і вузлів;
- поліпшення якості виготовлення і ремонту, а також зміну і доповнення існуючої технології і технічних умов на виготовлення і ремонт;
- зміну і доповнення інструкцій з експлуатації і технічного обслуговування;

– усунення недоліків і порушень, які можуть мати місце при експлуатації і технічному обслуговуванні.

## **6 ВИЗНАЧЕННЯ ПРИЧИН УТВОРЕННЯ ТРІЩИН У МЕТАЛІ ПО МІКРОСТРУКТУРІ**

### **6.1 Визначення причин тріщиноутворення по зламах**

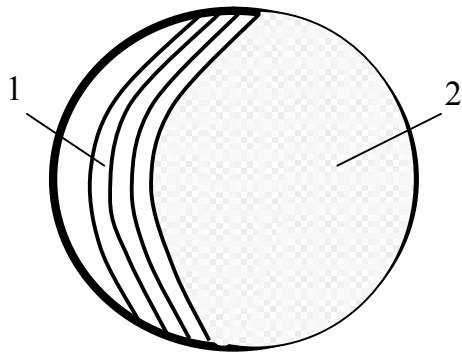
Причинами утворення тріщин в металевих деталях може бути руйнування деталей в процесі експлуатації із-за прикладених навантажень вище за допустимі. При цьому злам деталі може мати крихкий характер або в'язкий. Це залежить від структури і властивостей металу. При в'язкому руйнуванні відбуваються значні пластичні деформації металу і по структурі зламу можна сказати, що руйнування в'язке не представляється можливим із-за пластичної деформації. При крихкому руйнуванні в зламі можна розглянути кристалічну структуру металу – розміри зерна (крупнозерниста структура), характер зламу (транскристалічний, міжкристалічний). При транскристалічному зламі руйнування протікає по тілу зерна. При міжкристалічному зламі руйнування протікає по границях зерен.

При в'язкій структурі зламу можна з достовірністю сказати, що руйнування сталося із-за надмірних навантажень, при цьому винен той, хто експлуатував цей виріб.

При крихкому зламі, тоді коли злам має переважно міжкристалічне руйнування, можна звинуватити виготівника деталі або тих, хто проводить термообробку цих деталей. Міжкристалічний злам виходить найчастіше в тих структурах, коли в результаті термообробки виділяється крихка фаза, або при перепалі. Коли при нагріві при термообробці деталь нагрівалася до високих температур і при цьому відбувалося окислення границь зерен.

У разі роботи деталі зі знакозмінними навантаженнями можливе утворення втомних зламів (рисунок 6.1).

Характерною особливістю втомних зламів є наявність двофазної макроструктури. Втомна зона має поверхню як би гладку, шліфовану і має радіальні шари, а зона доламу має структуру або в'язкого, або крихкого руйнування і має шорстку поверхню.



1 – втомна зона

2 – зона доламу

Рисунок 6.1 – Схема двофазної макроструктури втомного зламу

Причинами втомного руйнування можуть виявитися тріщини по поверхні деталі, отримані при термообробці деталі або при обробці поверхні деталі. За наявності втомного зламу зазвичай винуватцями руйнування деталі вважаються виготівники деталі, а не ті, хто деталь експлуатує. В деяких випадках необхідно встановити причину утворення тріщини.

## 6.2 Можливі причини утворення тріщин і мікротріщин при термічній обробці деталей

При термообробці деталей часто утворюються тріщини і мікротріщини. Із-за нерівномірного нагріву деталей, особливо деталей, що мають складну форму, де є різкі переходи від масивних частин до частин малого перерізу. Тріщини можуть утворюватися на самому початку при нагріві деталі, або у кінці термообробки при прискореному охолодженні. Тріщини, що утворилися при нагріві, називаються *гарячими*, при охолодженні - *холодними*, у тому числі і ті, які можуть утворитися не лише при охолодженні, але і при витримці після термообробки із-за значної внутрішньої напруги.

Характерні особливості *гарячих* і *холодних* тріщин:

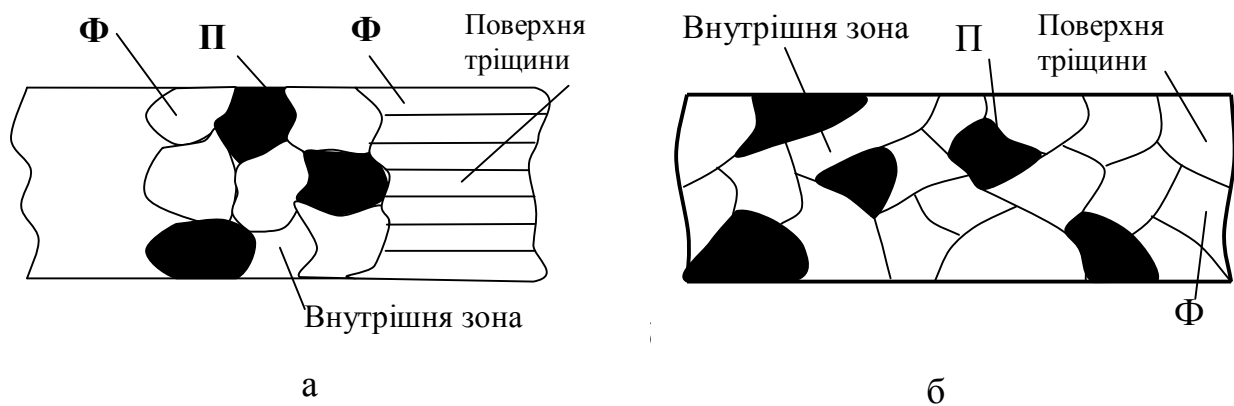
- *гарячі* тріщини, які утворилися на початку нагріву деталі: краї тріщини окислюються в процесі нагріву, і тріщина заповнюється оксидами. Якщо виготовити мікрошліф країв тріщини, то поверхня тріщини часто має знеуглецьовану структуру. Знеуглецьовуючим середовищем виступає оксид, що заповнює тріщину ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). По структурі знеуглецьованого шару можна визначити температуру, при якій проходило знеуглецьовання.

Наприклад (рисунок 6.2), в першому випадку сталь з вмістом вуглецю  $\sim 0,4\%$  нагрівалася нижче  $210\text{ }^\circ\text{C}$ . При нагріві до температури нижче  $910\text{ }^\circ\text{C}$  сталь 40 придбала аустенітну структуру.

При видаленні вуглецю з поверхні, на поверхні відбувається поліморфне перетворення аустеніту на ферит. Зародки фериту, що утворилися, які у міру видалення вуглецю, проростатимуть в глиб структури, утворюючи стовпчасті зерна фериту.

При нагріві вище  $910\text{ }^\circ\text{C}$  (рис. 6.2, б) видалення вуглецю з поверхні деталі не призводить до поліморфного перетворення  $A \rightarrow \Phi$ , і аустенітна структура зберігається при цих температурах і на поверхні, і усередині деталі.

Поверхневий аустеніт відрізнятиметься від аустеніту центральних зон тільки вмістом вуглецю. На поверхні аустеніту вуглецю буде дуже мало, а у внутрішніх шарах вміст вуглецю буде початковим. При охолодженні на поверхні низьковуглецевий аустеніт перетворюється на ферит, утворюючи рівноосні зерна. У центральній зоні відбувається поліморфне перетворення аустеніту спочатку з виділенням надмірного фериту, а потім і перліту.



а – при нагріві нижче  $910\text{ }^\circ\text{C}$ , б – при нагріві вище  $910\text{ }^\circ\text{C}$

Рисунок 6.2 – Схема мікроструктури металу в зоні утворення тріщини

Перехід зони з чистим феритним шаром до початкової структури має плавний характер за вмістом вуглецю, тобто кількість перлітових колоній плавно збільшується до початкового стану, і немає різкої межі, як в першому випадку.



Додаток А  
Приклад оформлення Акту матеріалознавчої (металознавчої) експертизи

## ПОСТАНОВЛЕНИЕ

о назначении металловедческой экспертизы  
(какой)

Гор. (село) Днепродзержинск « 6 » октября 1990 г.

Следователь СО Терновского РОВД г. Днепродзержинска к-н  
милиции

(должность, звание, фамилия)

Рассмотрев материалы уголовного дела № 95428 о ДТП по ул. Сурикова

### УСТАНОВИЛ:

26 июля 1990 года Куница С.В. управляя автомашиной «ГАЗ-52» и двигаясь по ул. Сурикова, в районе здания СУ № 352 п/о «Днепроэлектромонтаж» допустил наезд на электроопору, в результате чего ехавшая в кабине автомашины гр-ка Харченко Е.Л. была травмирована.

При осмотре автомашины «ГАЗ-53» была обнаружена и изъята тормозная трубка, соединяющая тормозную систему с рабочим тормозным цилиндром левого переднего колеса машины. В указанной трубке была обнаружена трещина, из которой вытекала тормозная жидкость. Свидетель водитель Никишин С.В. показал, что именно из-за этой неисправности отказала тормозная система, что стала причиной наезда на электроопору.

Принимая во внимание, что по настоящему делу необходимы специальные познания в области металловедения и руководствуясь ст. ст. 75 и 196 УПК УССР

### ПОСТАНОВИЛ:

1. Назначить по настоящему делу металловедческую экспертизу, производство которой поручить Днепропетровскому металлургическому институту по назначению

2. На разрешение экспертизы поставить следующие вопросы: \_

1) Возникла ли разгерметизация рабочей тормозной системы автомобиля «ГАЗ-53» гос. номер 45-84 ДНА одновременно или неисправность возникла задолго до наезда на электроопору при дорожно-транспортном происшествии по ул. Сурикова, если до наступления данного события, то каким образом мог выявить эту неисправность водитель Куница С.В.?

2) Каков характер излома, следов усталостного разрушения, обнаруженного в тормозной трубке, соединяющей тормозную систему с рабочим тормозным цилиндром левого переднего колеса автомобиля «ВАЗ-21053». Каким методом и когда мог и должен был выявить неисправность тормозной трубки гидравлического привода тормоза левого переднего колеса «ГАЗ-53» водитель Куница С.В.?

3) Для исследования эксперту(ам) направить тормозную трубку, изъятую с автомобиля «ГАЗ-53» гос. номер 45-84 ДНА

4) Для ознакомления эксперту (ам) представить уголовное дело № 95428

5) Копию настоящего постановления направить Днепропетровский металлургический институт.

Следователь СО Терновского РОВД г. Днепродзержинска

Капитан милиции Юшкович В.И.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

металлографической экспертизы по факту дорожно-транспортного происшествия, при котором была травмирована гр. Харченко Е.Л.

*Составлено 17.11.1990*

### **ВВЕДЕНИЕ**

10 октября 1990 г. мне, эксперту-металловеду по назначению, Иванову Никите Андреевичу, кандидату технических наук, старшему научному сотруднику по специальности «Металловедение и термическая обработка металлов» следователем СО Терновского РОВД г. Днепродзержинска Юшкович В.И. для проведения металловедческой экспертизы были вручены материалы уголовного дела № 95428.

Об уголовной ответственности по статье 178 УК УССР за дачу заведомо ложного заключения я предупрежден.

/ Иванов Никита Андреевич /

При составлении заключения использована следующая литература:

1. Л. Энгель, Г. Клингеле «Разрушение, растровая электронная микроскопия, Справочник» – Москва, «Металлургия», 1986 г.

2. Электронная микроскопия в металловедении. Справочник под ред. А.В. Смирновой. Москва, «Металлургия», 1985 г.

Краткое содержание обстоятельств происшествия:

26 июля 1990 г. Куница С.В., управляя автомашиной «ГАЗ-53» и двигаясь по ул. Сурикова, в районе СУ № 453 п/о «Днепроэлектромонтаж» допустил наезд на электроопору, в результате чего ехавшая в кабине автомашины гражданка Харченко Е.Л. была травмирована.

При осмотре автомашины «ГАЗ-53» была обнаружена и изъята тормозная трубка, соединяющая тормозную систему с рабочим тормозным цилиндром левого переднего колеса машины. В указанной трубке была обнаружена трещина, из которой вытекала тормозная жидкость. Свидетель водитель Куница С.В. показал, что именно из-за этой неисправности отказала тормозная система, что стало причиной наезда на электроопору.

На разрешение экспертизы поставлены следующие вопросы:

1. Возникла ли разгерметизация рабочей тормозной системы автомобиля «ГАЗ-53» гос. номер 45-84 ДН одномоментно или неисправность возникла задолго до наезда на электроопору при дорожнотранспортном происшествии по ул. Сурикова, если до этого события, то каким образом мог выявить эту неисправность водитель Куница С.В.?

2. Каков характер излома, обнаруживаются ли следы усталостного разрушения в тормозной трубке, соединяющей тормозную систему с рабочим тормозным цилиндром левого переднего колеса автомобиля «ГАЗ-53». Каким методом и когда мог и должен был выявить неисправность тормозной трубки гидравлического привода тормоза левого переднего колеса «ГАЗ-53» водитель Куница С.В.?

1. Исследование по первому вопросу

На экспертизу представлен пакет с медной тормозной трубкой, опечатанный печатью Терновского РОВД г. Днепродзержинска с соответствующими подписями.

Внешний осмотр тормозной трубки позволил выявить пластическую деформацию металла, проявляющуюся в смещении следов первичной механической обработки (волочения) трубки относительно ее образующей

(Фототабл. 1). Характер деформации указывает на скручивание трубки по часовой стрелке. Учитывая, что данное направление деформации соответствует закручиванию крепежных штуцеров и тот факт, что степень деформации металла трубки максимальна в области, прилегающей к штуцерам (Фототабл. 1) прихожу к заключению, что указанная деформация произошла при изначальной установке трубки на автомобиль и не является следствием ее демонтажа после аварии.

В пользу сделанного вывода свидетельствуют также следы механического повреждения трубки внутренней поверхностью штуцеров, значительная окисленность которых говорит о давнем времени их происхождения /Фототабл. 1/, а также следующее из материалов дела отсутствие вращательного момента, действующего на трубку при аварии автомобиля.

Дальнейшее исследование причин разрушения представленной на экспертизу детали производилось методом растровой электронной микроскопии, поскольку именно этот метод наиболее ясно дает представление о механике процессов разрушения. Анализ выполнялся на приборе JSM – 35 фирмы «Деол» (Япония) при ускоряющем напряжении 25 кВ, разрешающей способности  $70 \text{ \AA}$  в диапазоне увеличений от  $\times 60$  до  $\times 10000$  крат.

Для ответа на вопрос о времени возникновения несплошности в тормозной трубке из нее был вырезан с помощью ножовки дефектный участок длиной  $\sim 10$  мм. Полученный образец подвергался ультразвуковой очистке сначала в бензине, а затем в спирте с помощью ультразвукового диспергатора УЗДН-М по традиционной методике. Время диспергирования составляло 3 мин., частота излучателя 22 кГц.

Излучение поверхности трубки в зоне, прилегающей к трещине (Фототабл. 2а) позволило выявить наличие признаков начальной стадии усталостного разрушения.

К ним относятся экструзии и интрузии (Фототабл. 2б) и зародышевые трещины, усталостное происхождение которых подтверждается их расположением под углом  $45^\circ$  относительно направления растягивающих напряжений (Фототабл. 2в).

Поскольку участок разрушения трубки располагается непосредственно в области выявленной ранее (см. Фототабл. 1) пластической деформации металла, то можно сделать следующий вывод о причине возникновения

дефекта. Пластическая деформация металла трубки, связанная с ее закручиванием при значительной установке на автомобиль, т.е. возникшая задолго до наезда на электроопору привела к появлению зоны концентрации напряжений вблизи крепежных штуцеров, которая в свою очередь инициировала начало усталостного разрушения под действием циклических нагрузок, испытываемых узлами шасси автомобиля при эксплуатации. Учитывая длительный срок образования начальной усталостной трещины и то что она может быть выявлена только при микроскопических исследованиях прихожу к заключению о невозможности распознавания водителями Куница С.В. указанного дефекта при эксплуатации автомобиля.

## 2. Исследование по второму вопросу

Для определения характера излома и особенностей распространения усталостного разрушения было произведено искусственное раскрытие трещины с последующим фототрафическим анализом поверхности ее развития (Фототаблица 3).

Изучение области излома, прилегающей к внешнему диаметру трубки показало наличие характерных полос – бороздок усталостного разрушения, перпендикулярных направлению развития трещины (Фототабл. 3б). Расстояние между полосами и их количество определяются числом циклических нагружений, однако, количественная оценка скорости распространения трещины в данном случае невозможна из-за сложности и не периодичности действующих на передний мост автомобиля нагрузок при его эксплуатации. Отмечается уширение усталостных бороздок в направлении от внешнего к внутреннему радиусу трубки, что говорит о увеличении скорости распространения трещины на последней стадии разрушения (зонадолома) (Фототаблица 3в).

Для проверки однозначности сделанных выводов о усталостном механизме разрушения тормозной трубки, характеризующимся значительным временем от момента его начала до образования несплошности, в системе гидравлического привода был изучен искусственно полученный излом той же трубки, в условиях одномоментного ее разрушения.

Как видно из представленных на фототаблице 4 материалов разрушения трубки в случае ее обычного механического растяжения приводит к формированию вязкого транскристаллитного излома, не имеющего признаков усталостного разрушения.

Таким образом, образовавшийся при разрушении тормозной трубки излом может быть идентифицирован как усталостный. Обнаружить образование усталостной трещины водитель Куница С.В. не мог по указанным ранее (см. 1-й вопрос заключения) причинам.

### 3.1 Выводы

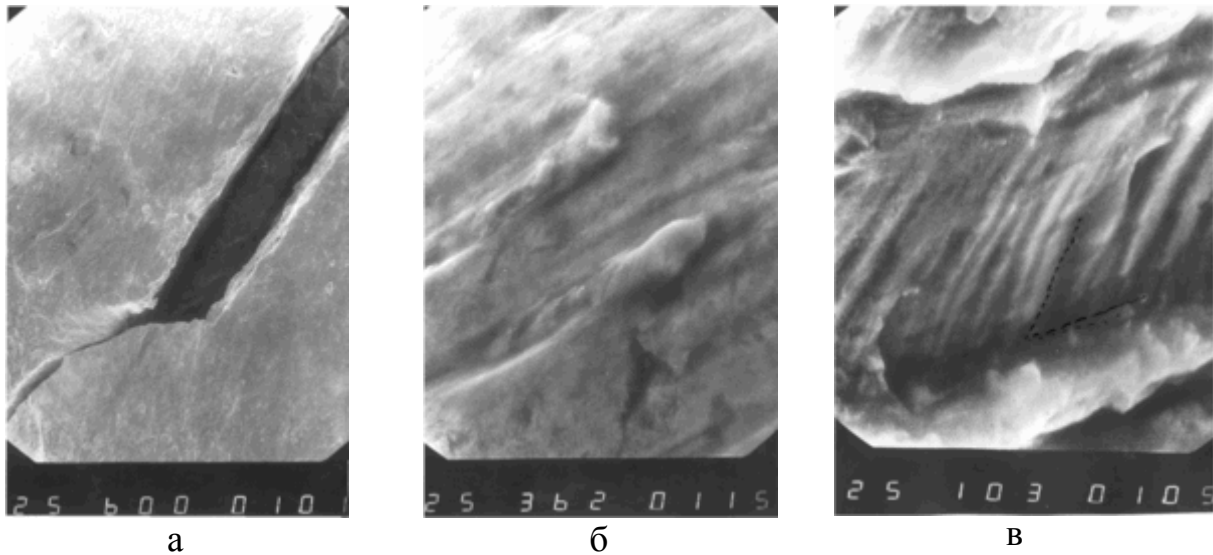
1. При изначальной установке тормозной трубки на автомобиль было допущено ее перекручивание, что привело к возникновению в местах крепления к системе гидравлического привода концентраторов напряжений, инициирующих зарождение усталостной трещины.

2. Судя по характеру излома усталостное разрушение тормозной трубки происходило медленно и не могло быть обнаружено водителем Куницей С.В. при эксплуатации автомобиля.

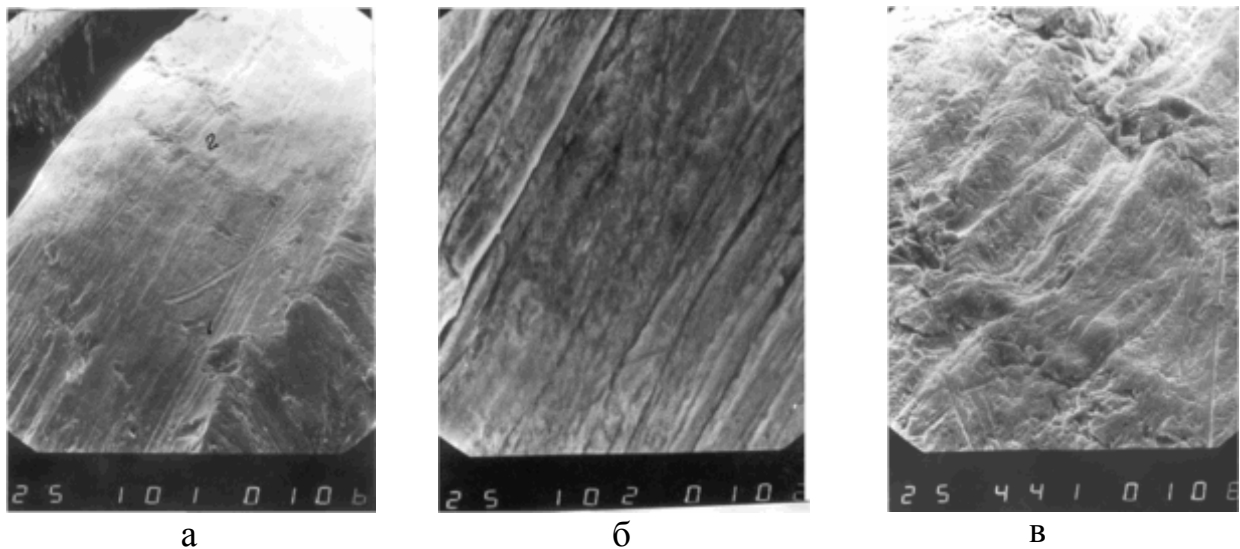
/ Иванов Н.А./



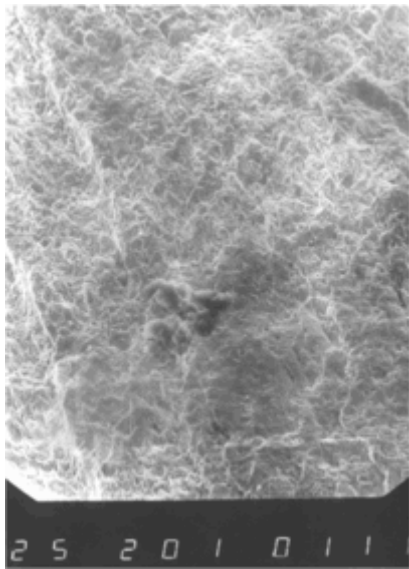
Фототаблица I. Общий вид тормозной трубки /а/ и места ее разрушения /б/ обозначения: 1– следы пластической деформации; 2– место максимальной пластической деформации; 3 – следы механического повреждения трубки о внутреннюю поверхность крепежного шнура



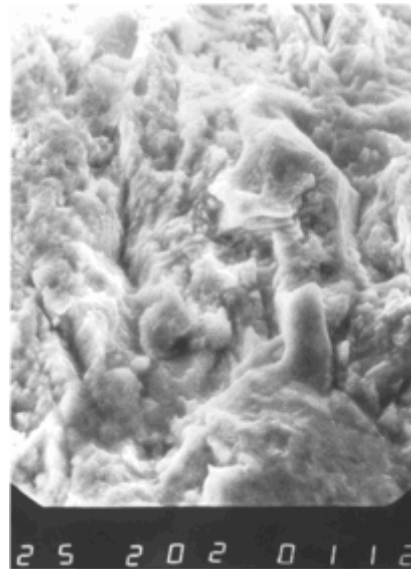
Фототаблица 2. Фрактограмма зоны, прилегающей к трещине:  
 а – общий вид, х60; б – экструзии и интрузии на поверхности трубки, х3600;  
 в – зародышевые усталостные трещины, х10000



Фототаблица 3. Морфология излома, образовавшегося при образовании усталостной трещины: а – общий вид х 100; б – усталостные бороздки на начальной стадии разрушения (участок I на общем виде), х 1000;  
 в – усталостные бороздки на заключительной стадии разрушения (участок 2 на общем виде), х 440

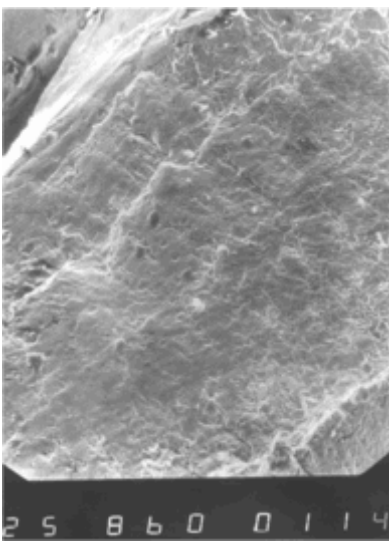


а

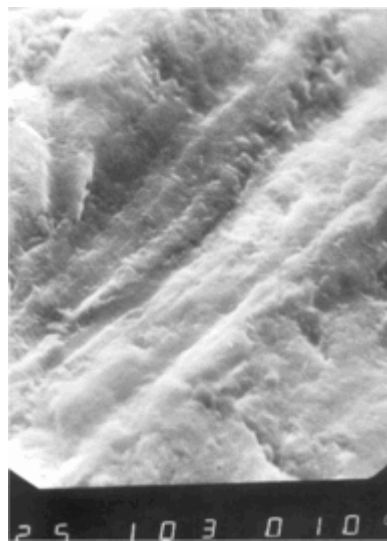


б

Фототаблица 4. Морфология поверхности искусственно полученного излома при одномоментном разрушении трубки: а - общий вид, х 200; б – фасетки вязкого разрушения, х 2000



а



б



в

Фотографии, не приобщенные к заключению



«УТВЕРЖДАЮ»

следователь

С.О. Терновского РОВД

«\_\_» \_\_\_\_\_ 1990 г.

ТАБЕЛЬ

работы по выполнению металлографической  
экспертизы по уголовному делу № 95428  
в Терновском РОВД

1. Уяснение поставленной задачи	2 час.
2. Изучение материалов дела	4 час.
3. Выбор, оценка, анализ исходных данных	6 час.
4. Применение методики исследования	6 час.
5. Прорезка образцов, подготовка объекта для электронно- -микроскопических исследований	8 час.
6. Выполнение исследований методом растровой электронной микроскопии	20 час.
7. Анализ полученных результатов	16 час.
8. Формулирование выводов	4 час.
9. Изготовление фототаблиц	8 час.
10. Составление заключения и его оформление	6 час.

---

ВСЕГО:

80 часов

/ Н.А. Иванов /

## РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Л. Энгель, Г. Клингеле // Разрушение, растровая электронная микроскопия. – Справочник – М. – Металлургия. – 1986 г.
2. Электронная микроскопия в металловедении: Справочник под ред. А.В. Смирновой. – М.: – Металлургия, 1985 г.
3. Герасимова Л.П., Ежов А.А., Маресев М.И.. Изломы конструкционных сталей: Справочник. – М.: Металлургия, 1987. – 271 с.
4. Усталость и вязкость разрушения металлов/ Под ред Т.А. Мумриенко. Сборник научн. трудов. – Ин-т металлургии им. А.А. Байкова. – М. Наука. – 1974. – 262 с.
5. Фридман Я.Б., Гордеева Т.А., Зайцев А.М.. Строение и анализ изломов металлов. – М. – Машгиз, 1960. – 128 с.
6. Фрактография и атлас фрактограмм. Перевод с англ. Е.А. Шура. Под ред. М.Л. Бернштейна: Справочник. – М.: Металлургия. – 1982. – 490 с.

Навчальне видання

Куцова Валентина Зиновіївна  
Федоркова Наталія Миколаївна

## ЕКСПЕРТИЗА МАТЕРІАЛІВ ТА МЕТАЛІВ

Навчальний посібник

Тем. план 2015, поз. 63

Підписано до друку 17.06.2015. Формат 60x84 1/16. Папір друк. Друк плоский.  
Облік.-вид. арк. 3,0. Умов. друк. арк. 2,95. Тираж 100 пр. Замовлення №112.

Національна металургійна академія України  
49600, м. Дніпропетровськ-5, пр. Гагаріна, 4

---

Редакційно-видавничий відділ НМетАУ