

Міністерство освіти і науки України
Дніпропетровський національний університет
Імені Олеся Гончара

ФРАКТОГРАФІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ ПРИЧИН РІЗНУВАННЯ МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ

Навчальний посібник

Дніпро
2023

Міністерство освіти і науки України
Дніпропетровський національний університет
Імені Олеся Гончара

Кафедра ракетно-космічних та інноваційних технологій

Божко С.А., Санін А.Ф, Ткачов Ю.В., Хуторний В.В.

ФРАКТОГРАФІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ ПРИЧИН РІЗНУВАННЯ МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ

*Ухвалено Вченою радою фізико-технічного факультету Дніпровського
національного університету імені Олеся Гончара
як навчальний посібник*

Дніпро

2023

УДК 621.732.7

Фрактографічні дослідження аналіз причин руйнування металів і сплавів: навчальний посібник/,С.А. Божко, А.Ф. Санін, Ю.В. Ткачов, В.В. Хуторний-Д...:ДНУ, 2023 – 30с.

Для студентів, бакалаврів, магістрів та аспірантів фізико-технічного факультету, що навчаються за спеціальністю «Прикладне матеріалознавство», «Металорізальні верстати та системи» та іншими за напрямками «Технологія машинобудування» та «Інженерне матеріалознавство»

ВСТУП

Термін «фрактографія» виник в 1944 році для визначення науки, що вивчає поверхні руйнувань, хоча металурги вивчають тріщини вже багато століть. Важливість фрактографії для металургії визначається тим, що, по-перше, вона є ефективним засобом аналізу причин експлуатаційних пошкоджень, по-друге, дає нову інформацію щодо макромеханізмів руйнування і внутрішніх особливостей будови твердого тіла.

Вивчення особливостей поверхонь зламу за допомогою світлової фрактографії широко застосовується в тих випадках, коли можна розглянути переломи при невеликому збільшенні. Таке дослідження може проводити персонал середньої кваліфікації з використанням відносно простого обладнання.

Розглянуто методи, що застосовуються у фрактографії з низькими збільшеннями, та дано рекомендації щодо дослідження поверхонь руйнування з використанням високих збільшень.

Область малих збільшень, або *макрофрактографія*, передбачає роботу або з деяким зменшенням, або зі збільшеннями не більше 50. Великі збільшення, або *мікрофрактографія*, охоплюють діапазон збільшень від 50 до деякої верхньої межі, яка залежить від чисельної діафрагми об'єктивної лінзи, довжини хвилі використовуваного світла і, певною мірою, від контрасту, властивого досліджуваній поверхні металу.

Фрактограми, отримані при збільшенні вище тих, які забезпечують хорошу роздільну здатність, марні, оскільки не розкривають нових деталей, а просто лінійно збільшують зображення структури зламів.

АНАЛІЗ СТРУКТУРИ ЗЛАМІВ

I. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ

В результаті пружної і пластичної деформації, що супроводжується утворенням і розвитком тріщин, а потім і повного руйнування, навантажені деталі і зразки діляться на дві і більше частин з утворенням поверхонь розділів, які називаються *зламами*.

Поверхні, що утворюються при руйнуванні зносом, корозією, а також поверхні після механічної обробки до зламів не відносяться.

При цьому поверхні розділів при руйнуванні від сумісного корозійно-механічного впливу відносять до зламів.

Вивчення структури зламів називається *фрактографією*, рідше *фрактологією*, а методи дослідження - *фрактографічними*.

Дослідженню зламів відводиться особливе місце серед інших фізичних методів при вивченні взаємозв'язку між складом і структурою матеріалу і міцності, а також при вивченні процесу утворення і розвитку тріщин. Це пов'язано з тим, що при аналізі структури зламів отримують інформацію про процес руйнування, яку в більшості випадків неможливо отримати іншими методами.

Можна виділити три основні причини, за якими аналіз зламів має велике наукове і практичне значення:

1. У структурі зламу чітко відображені всі стадії процесу руйнування і тому аналіз структури зламу є єдиним методом, за допомогою якого після закінчення руйнування можна отримати інформацію про перебіг цього процесу.

2. При зламі виявляються зони, де найбільш несприятливо поєднуються умови навантаження і властивості матеріалу, його здатність до локальної стійкості до руйнування, так як злам є слід від основної тріщини, яка виявилася вирішальною для відділення частки тіла.

3. Структура руйнування відображає локальні умови руйнування в тонкій зоні, прилеглий до поверхні руйнування; характеристику типу руйнування - крихкий або в'язкий - оцінює ступінь мікропластичної деформації, яка відбулась в процесі руйнування у тонкому шарі поблизу роздільної поверхні тіла.

Аналіз структури руйнування в основному використовується для:

- вивчення закономірностей процесу руйнування: його механізму, кінетики, впливу структурних факторів і т.п.;
- встановлення характеру і причин експлуатаційного руйнування;
- оцінки якості матеріалу.

Аналіз зламів, як правило, є однією зі складових загального дослідження. Вивчення зламів може і повинно доповнюватися і супроводжуватися іншими фізико-механічними методами дослідження. Слід зазначити, що при дослідженні кінетики зламів доцільно поєднувати аналіз зламів з аналізом діаграм руйнування «довжина тріщини - час», «довжина

тріщини - кількість циклів» і т. д. Поряд з вивченням зламів важливий і аналіз тріщин: їх траєкторії, кількості, розподілу і т. п., що дозволяє повністю виявити пошкоджені ділянки тіла.

Формування зламу тісно пов'язане не тільки з процесом виникнення і розвитку тріщин, але й з процесами пружної і пластичної деформації, з явищами недосконалостей пружності. Злами можна класифікувати за типом і умовами навантаження; за характером руйнування.

За типом навантаження слід розрізняти злами, що виникли від одноразово прикладених навантажень: статичні короткочасні або тривалі, ударні або змінні.

У кожній з цих груп будова зламів буде мати ряд специфічних особливостей, обумовлених способом прикладеного навантаження і, відповідно, пропорціями тангенціальних і нормальних напружень.

Умови навантаження визначаються впливом температури, при якій проводиться випробування, наявністю активного або агресивного середовища, величиною пружного запасу енергії, піддатливістю системи і т. п.

Під характером руйнування розуміють характер поширення тріщини - *внутрішньограничний* або *міжкристалічний* - і ступінь розвитку в процесі руйнування пластичної деформації, так зване крихке або пластичне руйнування.

За характером поширення тріщини можна розрізнити злами: пластичні з внутрішньограничним руйнуванням і з міжкристалічним руйнуванням; крихкий з внутрішньограничним руйнуванням і з міжкристалічним руйнуванням.

Наведена класифікація багато в чому умовна, в основному через неоднорідність структури зламів, що є наслідком наступних основних причин:

- неоднорідність структури і властивостей матеріалу;
- зміна деформованого і напруженого стану матеріалу в процесі поширення в ньому тріщини;
- зміна умов зовнішнього навантаження в процесі руйнування, температури, середовища і т.п.

У зв'язку з цим при класифікації зламу враховують переважний характер його будови і, особливо в початковій зоні, відповідній початковій стадії руйнування.

2. МЕТОДИ ФРАКТОГРАФІЧНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ.

Відомі наступні методи дослідження поверхонь зламу і зон матеріалу, безпосередньо прилеглих до зламу:

1) макро- і мікроскопічна фрактографія - дослідження поверхні зламу неозброєним оком або за допомогою макрозбільшення до 20-60 разів, а також дослідження поверхні зламу за допомогою оптичного металографічного мікроскопа при збільшенні до 1000 разів, і електронного мікроскопа при збільшенні більш ніж в 2000 разів;

2) безпосереднє вимірювання і фотометрія геометрії поверхні зламу, визначення розміру структурних складових або вимірювання шорсткості і орієнтації елементарних ділянок на поверхні зламу;

3) електрохімічні, рентгенографічні, електроіндукційні, магнітні, мікромеханічні та інші методи локального вивчення фазового складу, спотворень кристалічної решітки, механічних і фізичних властивостей матеріалу.

Різноманіття завдань, які можуть бути поставлені при дослідженні зламів, виключає можливість єдиного підходу і єдиної методики їх вивчення. Метод дослідження слід вибирати з урахуванням поставленого завдання і характеру досліджуваного об'єкта. Однак візуальний огляд і огляд поверхні зламу при незначному збільшенні обов'язкові.

Приладами, необхідними для вивчення зламів при малих збільшеннях, є біноклярний стереоскопічний мікроскоп, наприклад, мікроскоп МБС-2 і установка FMN-2 для макрофотографії.

При візуальному огляді встановлюється макроорієнтація поверхні зламу, її зв'язок з дією нормальних (відрив) або дотичних (зріз) напружень. Візуальний огляд зламу іноді дозволяє при досить крупнозернистій структурі матеріалу (при розмірі зерен 50 мкм і більше) виявити, як поширюється руйнування: по тілу або по кордонах зерен.

Внутрішньокристалічна сепарація характеризується блискучим, так званим кристалічним руйнуванням, при цьому злам при розрізі матовий зі слідами пластичної деформації, що передувала розрізу.

Практична робота № 1

ПІДГОТОВКА ТА ФОТОГРАФУВАННЯ РОЗРУШЕНИХ ДЕТАЛЕЙ І ПОВЕРХНІ ЗЛАМІВ

Правильна інтерпретація зламів залежить від того, наскільки усунути сторонні фактори, які можуть спотворити характеристики поверхонь руйнування та призвести до хибних висновків.

Зазвичай злами піддають дослідженню з використанням різних методик. Так як деякі з них можуть вплинути на отримані результати і навіть можуть змінити вид зламів, необхідно зберегти докладні записи всіх операцій, виконаних над зламами до дослідження і в процесі його.

У цій роботі розглянуті методики запобігання поверхонь зламів від забруднення, очищення поверхонь зламу, розрізання деталей, що зламалися, для отримання зразків і розкриття вторинних тріщин.

1. ПІДГОТОВКА ОБ'ЄКТІВ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 ЗБЕРІГАННЯ ЗЛАМІВ МЕТАЛІВ

Коли відбувається руйнування і передбачається, що злам буде підданий лабораторному дослідженню, необхідно провести кілька операцій для отримання максимуму інформації. Більшість цих операцій, описаних нижче, не залежать від особливостей методик дослідження, які будуть використані.

Усі операції, що проходять над зламами, повинні бути засновані на визнанні того факту, що поверхня зламу містить багато цінної інформації і будь-яке знищення цієї інформації може ускладнити інтерпретацію зламу.

Можна виділити два типи пошкоджень, до яких можуть бути схильні підтверджені злами - **механічні і хімічні**.

Механічні пошкодження можуть відбуватися з різних причин, включаючи зіткнення з іншими деталями. Це можливо під час руйнування (наприклад, при невдалому приземленні літака), при вилученні зламаних частин деталі або при перевезенні їх з одного місця на інше. Визначення та ретельний аналіз наслідків пошкодження – найкращі шляхи для запобігання пошкодженням цього типу. Наприклад, при перевезенні злам можна захистити тканиною або ватою, проте при цьому можна видалити з нього певну кількість нещільно зчепленого матеріалу, який часто містить основну інформацію, що дозволяє встановити причини руйнування.

Не слід торкатися зламу пальцями або протирати його. У людини, що розглядає деталь, яка зламалася, часто виникає бажання бачити частини зруйнованої деталі з'єднаними разом. Це зазвичай нічого не дає для

розуміння процесу руйнування і майже завжди спричиняє пошкодження поверхні зламу. Цього треба уникати.

Хімічного (корозійного) пошкодження зламу можна запобігти різними способами. Різні лабораторії віддають перевагу різним методам захисту зламів. Оскільки присутність стороннього матеріалу на поверхні зламу може утруднити встановлення причини руйнування, багато які лабораторії вважають за краще не використовувати для консервації зламів антикорозійні покриття.

Якщо це можливо, краще висушити злам, переважно використовуючи струмінь сухого стисненого повітря (який може також здути сторонній матеріал з поверхні), і потім помістити його в ексікатор або упакувати з осушувачем.

Покриття. Якщо не потрібен аналіз стороннього матеріалу, що присутній на поверхні зламу (наприклад, при дослідженні зламів зразків, випробуваних у лабораторних умовах), хорошим способом для збереження зламу та запобігання його корозії є застосування покриття. Злами з великою поверхнею можна покрити шаром свіжого тавоту. Інший спосіб полягає в розміщенні зламаної деталі у пластиковий контейнер із силікагелем. Покриття можуть бути напилені на злам або злам можна занурити в рідкий матеріал покриття. Широко використовують чисто пластикові покриття, крізь які добре видно злам. Ці пластикові покриття можна потім видалити трихлоретиленом.

Як покриття застосовують чисто акрилові лаки, так як їх можна легко повністю видалити за допомогою кетонів.

Для запобігання корозії рекомендується користуватися спеціальним розчинником на основі нафтопродуктів, який легко видаляється.

До покриття пред'являють такі вимоги: відсутність хімічної дії на злам та повне (або легке) видалення. Лаки на основі нітрату целюлози та поліуретанові фарби, які застосовують у деяких лабораторіях, не задовольняють цим вимогам, тому що їх важко видалити із зламів.

Інший метод захисту зламів - нанесення на поверхню їх пластикових реплік. Найчастіше використовують ацетат целюлози. Він може бути розм'якшений і видалений за допомогою метилацетату, ацетону або суміші диметилкетону та толуолу. Обмеженням для застосування пластикових реплік є те, що вони рідко можуть бути повністю видалені. Це стає очевидним, коли злами досліджують за допомогою електронного растрового мікроскопа.

Не слід застосовувати для захисту поверхні зламів липку стрічку, оскільки вона погано видаляється і, ймовірно, внаслідок адсорбції води викликає корозію.

1.2 Очищення зламів металів

Зазвичай злам вимагає очищення, особливо, коли проводяться електронно-мікроскопічні дослідження. Очищення ведуть для видалення захисних покриттів, продуктів корозії та сторонніх осадів (наприклад, пилу), які можуть закривати частину зламу або ускладнювати інтерпретацію.

Однак перед очищенням слід продумати, чи не можуть осади на поверхні зламу дати корисну інформацію щодо причин виникнення або розвитку руйнування.

В різних лабораторіях використовують безліч різноманітних способів очищення, кожен із яких придатний для певного металу.

Використовують такі способи очищення зламів.

1. Обдування сухим повітрям, при якому видаляються всі сторонні, нещільно зчеплені зі зломом матеріали. Очищення м'якою щіткою сприяє їх видаленню, але при цьому слід виявляти особливу обережність, щоб не зашкодити поверхні зламу.

2. Обробка неорганічними розчинами - зануренням або струменем, що подається насосом, для видалення олії, пилу або пластикових покриттів. Це промивання може супроводжуватися використанням ультразвуку (див. п. 4 нижче), нагріванням розчинника або вакуумним очищенням. Як правило, очищати злам щіткою не слід. Застосування для очищення спектрально чистих речовин та збирання відпрацьованих розчинників забезпечують подальший аналіз матеріалів, видалених з поверхні зламів.

3. Обробка слабкими кислотними або лужними розчинами (залежно від металу), що впливають на осади та практично не діють на основний метал. Таку обробку використовують тільки як крайній засіб, оскільки вона може знищити тонкі деталі на зламів, роблячи марним подальше електронно-мікроскопічне дослідження.

Для сплавів на основі заліза використовують оцтову та фосфорну кислоту, а також гідроокис натрію, при необхідності у нагрітому стані. Можна також використовувати деякі інші розчини, дотримуючись обережності, щоб запобігти видаленню включень з металевої основи. Застосування ультразвуку (див. п. 4) при очищенні може бути корисним.

Дуже товсті шари іржі та окалини часто можна видалити розчинами амонієвих солей лимонної та щавлевої кислот. Іншою рекомендованою операцією для сплавів на основі заліза є занурення на 1...15 хв. у 6 н. розчин соляної кислоти, що містить 2 г/л гексаметилентетраміну. Використовують також сульфамінову кислоту. Для очищення зламів титанових сплавів краще застосовувати азотну кислоту. Поверхні зламів алюмінієвих сплавів слід очищати органічними розчинниками.

4. Ультразвукове очищення з використанням водяних миючих засобів. Цей метод є ефективним і не призводить до пошкодження зламу. Ультразвук у поєднанні з органічними розчинниками, слабкими кислотними або лужними розчинами можна використовувати для видалення бруду або осадів, коли цей процес утруднений.

Продукти окислення та корозії досить успішно видаляються зі сталевих зламів при використанні одночасно ультразвуку та катодного очищення в розчинах карбонату натрію або гідроксиду натрію.

Процес нанесення та відділення пластикових реплік зазвичай повторюється від двох до п'яти разів (див. статтю 8 про електронний мікроскоп, що просвічує, і його застосування у фрактографії). Незв'язані частинки при цьому потрапляють у пластикову репліку та закріплюються у ній. При відділенні репліки вони видаляються. Слід стежити, щоб частинки пластику не залишилися на поверхні зламу.

Такі хімічні реакції, як окиснення, зачіпають основний метал. Частина металу біля поверхні зламу руйнується в результаті окислення, і видалення окисленого шару не повертає злам до його первісного вигляду. Ніякий злам, який механічно або хімічно пошкоджений до дослідження, не може бути відновлений до початкового стану жодними операціями очищення.

Для консервації та очищення зламів можна користуватися також рекомендаціями, що є в інших посібниках. Методики очищення зламів різних металів, у тому числі й очищення репліками, наведені у книзі «Елементи фрактографії» Д. А. Рідера.

1.3 Розрізання зламів

Часто буває необхідно відокремити частину деталі, що містить злам, від усієї деталі для того, щоб відновити останню або зменшити величину досліджуваного зразка до стандартної. Багато приладів, що використовуються для дослідження зламів, наприклад, растровий електронний мікроскоп і електронний мікроаналізатор, мають спеціальні камери для розміщення зразків, і розміри цих камер обмежують граничні розміри досліджуваних зразків. При цьому важливо зафіксувати на схемах або фотографіях місце **різів**, зроблених під час розрізання деталі (зразка) та власне зламу. Розрізання слід проводити таким чином, щоб злам і суміжні з ним поверхні не були пошкоджені і не зазнали будь-яких змін. Крім того, необхідно збереження зламу сухим щоразу, коли це можливо. Для більшості деталей простим способом відділення тієї її частини, де знаходиться досліджуваний злам, є **полум'яне різання**. Різ повинен бути на достатній відстані від зламу, щоб мікроструктура металу поблизу поверхні зламу не змінювалася під впливом нагрівання полум'ям і розплавлений метал не потрапляв на поверхню зламу.

Для розрізання деталей різного розміру можна використовувати пилку або **відрізне абразивне коло**.

Віддають перевагу **сухій розрізці**, так як охолоджуюча рідина може викликати корозію зламу або вимити важливі включення з його поверхні.

Однак застосування охолоджуючої рідини необхідно в тих випадках, коли суху розрізку не можна проводити на певній відстані від зламу, щоб уникнути нагрівання області зламу.

Встановлено, що деякі з покриттів, згадані раніше, можуть бути корисними під час розрізання. Наприклад, під час **полум'яної розрізки** злам можна захистити, покривши тканиною під час розрізання на пилці, напилюючи або якимось іншим чином наносячи на нього лак або суміш, що перешкоджає корозії.

1.4 Розкриття вторинних тріщин

Коли первинний злам пошкоджений або **прокородував** настільки, що необхідну інформацію отримати неможливо, бажано розкрити будь-які вторинні тріщини, щоб піддати вивченню їх поверхні.

Ці тріщини можуть дозволити отримати більше інформації, ніж первинний злам. Якщо розкриття їх невелике, а також якщо вторинні тріщини існували менший час, ніж тріщина, що призвела до утворення первинного зламу, то поверхні вторинних тріщин можуть бути меншою мірою уражені корозією.

При цьому можуть розкритися первинні тріщини, які не розвинулися до стадії повного руйнування.

При розкритті тріщин цих типів для дослідження слід бути обережним, щоб механічно не пошкодити поверхні зламу.

Зазвичай це можна виконати, якщо при розкритті дві поверхні зламу переміщуються у протилежних напрямках, перпендикулярних до площини зламу.

Зазвичай від тильного боку зламаної деталі до точки поблизу вершини тріщини роблять надріз пилкою, виявляючи надзвичайну обережність, щоб не довести його до вершини тріщини. Цей надріз пилкою зменшує площу перерізу шматка металу, який має бути зруйнований. Остаточо зламати зразок можна кількома способами:

а) закріпити дві сторони пошкодженої деталі у випробувальній розривній машині, якщо дозволяє її форма, та розтягувати;

б) затиснути зразок у лещатах і, вдаряючи молотком, відігнути одну половину деталі від іншої таким чином, щоб не пошкодити тріщини поверхні;

в) затиснути обидві частини пошкодженої деталі у захватах чи лещатах і згинати чи відтягувати їх окремо.

Бажано розрізняти поверхні зламу, отримані під час розкриття первинних або вторинних тріщин, та злами, отримані при первинному або вторинному розтріскуванні. Це можна зробити, якщо існує впевненість, що механізм руйнування при навантаженні в лабораторних умовах відрізняється від механізму руйнування в експлуатації, наприклад, при проведенні навантаження в лабораторії при дуже низькій температурі.

При низькотемпературному зламі слід подбати про запобігання конденсації води, оскільки це викликає корозію поверхні зламу.

Рекомендується до навантаження виміряти розкриття та довжину тріщин. Часто величину деформації зразків можна визначити шляхом вимірювання зсуву між суміжними половинками зламу. Це має бути зроблено до розкриття вторинних тріщин. Довжина тріщин також може бути важливою характеристикою при аналізі **втомних** зламів або при використанні методів механіки руйнування.

1.5 Вплив неруйнівного контролю

Багато з так званих методів неруйнівного контролю по відношенню до поверхні зламів не є повністю неруйнівними. Проникні рідини, що використовуються для виявлення тріщин, можуть корозійно впливати на злам деяких металів, а також призводити до осадження сторонніх сполук на поверхнях зламів. Все це може призвести до неправильного тлумачення природи зламу. Часто поверхню деталі, в якій підозрюють наявність тріщини, очищають для ретельного дослідження, при цьому нерідко використовують досить сильні кислоти, вплив яких потім можна виявити в закритій тріщині. Наприклад, наявність хлоридів на поверхні зламу сталі, яке мало довести, що деталь зруйнувалася через корозійне розтріскування, як було встановлено пізніше, було пов'язане з соляною кислотою, використаною для очищення деталей.

Навіть контроль за допомогою магнітного порошку, що часто використовують для визначення тріщин у сталевих деталях, може вплинути на подальші дослідження. Наприклад, іскріння, яке відбувається у закритих тріщинах, може впливати на поверхні зламу. Намагнічені деталі, які досліджують за допомогою растрового електронного мікроскопа, вимагають розмагнічування, якщо застосовують збільшення більше $\times 500$.

2. ФОТОГРАФУВАННЯ ЗРУЙНОВАНИХ ДЕТАЛЕЙ І ПОВЕРХНІ ЗЛАМУ

Фотографія відіграє важливу роль при фрактографічних дослідженнях. Насамперед, фотографують загальний вигляд зруйнованої деталі, потім поверхню руйнування та окремі деталі зони руйнування. Приміщення фрактографічної лабораторії, відведене для фотографування, повинно мати досить високу стелю, забезпечувати відсутність значної вібрації і, що найважливіше, допускати затемнення. (Повного затемнення не потрібно, але при експонуванні має бути досить темно, щоб уникнути зайвого підсвічування або відображення.)

2.1 Візуальне дослідження

Перш ніж приступити до фотографування поверхні зламу, необхідно ретельно вивчити отриманий зразок і виявити найважливіші деталі зламу та деякі додаткові зовнішні фактори (такі як забруднення або механічне пошкодження поверхні після руйнування).

Одночасно визначають необхідність спеціальної обробки поверхні. Дослідження зруйнованої деталі починають з візуального огляду (без застосування оптичних засобів), а потім проводять детальніше вивчення зламу за допомогою лупи (якщо необхідно з підсвічуванням) або за допомогою стереомікроскопа з невеликим збільшенням. Результати цих спостережень мають реєструватися. Їх враховують при подальшому аналізі та визначенні ймовірних причин руйнації. При цьому складають перелік деталей поверхні, що становлять інтерес для фотографування з необхідним збільшенням.

Наступний етап дослідження - фотографування загального виду зруйнованої деталі та окремих її частин, фіксація їх розмірів та стану, а також опис траєкторії руйнування по відношенню до окремих частин деталі. Наступним етапом роботи є ретельне дослідження зламу при розгляді його зображення на матовому склі задньої стінки фотоапарата або через **видошукач**. Вивчення необхідно починати із застосування прямого освітлення та передбачити використання косоного освітлення під різними кутами, а також отримання **темнопольного** зображення, щоб якнайкраще виділити та посилити деталі рельєфу поверхні руйнування. Крім того, це допоможе визначити зону поверхні руйнування, що становить найбільший інтерес, а також встановити необхідний рівень збільшення (при даному розмірі зображення) для виявлення тонких деталей. Після завершення цієї

попередньої стадії здійснюється відповідне фотографування зламу з реєстрацією зв'язку окремих кадрів по відношенню один до одного та до всього зламу.

2.2 Засоби для фотографування зруйнованих деталей

Деталі та вузли, розміри яких не дозволяють їх транспортувати до лабораторії, фотографують безпосередньо на місці руйнування. При цьому, щоб відокремити об'єкт, що фотографується, від іншого фону, використовують білий папір або великі шматки картону або полотна. Кут, під яким виконується фотографування, також намагаються вибрати таким чином, щоб усунути цей фон. Рекомендації щодо освітлення у разі фотографування поза лабораторією наведені у розділі 3.7.

Якщо це можливо, краще фотографувати деталі або вузли в лабораторії. При цьому для більших деталей використовують папір, білий або кольоровий, у рулонах різної ширини, що забезпечує нейтральний фон. Для підтримки однорідності фону нижню частину рулону слід відрізати в міру забруднення.

Зручно розміщувати дрібні деталі на столі або спеціальному стенді площею близько 1x1 м і висотою 0,6м. Для створення заднього плану можна використовувати рулон білого паперу шириною 900 мм. Для кріплення деталі використовують пластини, дерев'яні чи пластмасові опори, а також лабораторні затискачі. Засоби кріплення слід маскувати або розміщувати їх повністю під деталлю, або закриваючи відповідні ділянки папером.

Застосування для створення фону сірого або чорного паперу змінює тональні переходи. При цьому чорний фон дає чисту площу негативу, на якій легко робити позначки тушшю для ідентифікації зразка. На фотовідбитках ці позначки будуть білими. Однак якщо фотографія буде відтворюватися за допомогою офсетного друку, суцільні чорні ділянки великої площі можуть якісно не відтворитися.

2.3 Джерела світла

Важливе значення для фотографування зруйнованих деталей та поверхонь зламу має освітлення. Воно має бути інтенсивним та легко регульованим. Освітлювальні прилади повинні легко переміщатися та зберігати встановлене положення без зміщення. Підвісні флуоресцентні лампи можуть дати задовільне висвітлення для загального фотографування

деталей на чорно-білій плівці. Якщо зйомку здійснюють на кольорову плівку, то для відповідної передачі кольору необхідно використовувати фільтри. У разі застосування флуоресцентних ламп денного світла, задовільні результати дає пурпурний фільтр ССЗОМ. При цьому використовують кольорову плівку для зйомки при денному світлі та збільшують експозицію, відкриваючи діафрагму на дві третини. Якщо здійснюється масова кольорова фотозйомка, можуть бути використані флуоресцентні трубки для відповідної передачі кольору.

Для загального фотографування можна використовувати галогенні лампи на відповідних штативах. Ці софіти повинні мати колірну температуру 3200 К для кольорової плівки типу В і 3400 К для плівки типу А. При проведенні кольорової зйомки не слід змішувати джерела світла, що сильно розрізняються, якщо спеціально не потрібен ефект неврівноваженого кольору. Для задовільної фрактографічної зйомки необхідно кілька софітів, що допускають фокусування від вузької плями до широкого пучка. Два або три освітлювачі повинні за своїми параметрами забезпечувати виконання практично всієї роботи. Це можуть бути софіти потужністю 500 Вт або міні-прожектори 200 Вт. 200-ватні лампи випромінюють менше тепла. Лампи повинні бути обладнані «масками» та шторками для регулювання інтенсивності та напрямків освітлення.

Кругова флуоресцентна трубка досить велика, щоб оточити зразок або деталь, забезпечує хороше похиле освітлення. При цьому критичним параметром отримання кращого кута освітлення є висота по відношенню до поверхні зразка (див. рис. 3 і 10). Лампи з довгими флуоресцентними трубками можуть застосовуватися для паралельного освітлення (див. рис. 4).

Електронні імпульсні лампи та [лампи-спалахи](#) слід використовувати головним чином, коли потрібне підсвічування тіней або спеціальний колірний баланс світла. Електронні імпульсні лампи мають вбудовані допоміжні лампи, що сприяє створенню необхідних умов освітлення. [Спалах](#) встановлюють далеко від фотоапарата, при цьому необхідно додатково використовувати звичайні лампи (одну або більше).

2.4 Способи освітлення

При польовій зйомці рівні освітлення зазвичай вищі, ніж під час зйомки в приміщенні. Різких тіней при польовій фотографії можна уникнути, виконуючи зйомку або з відкритою блендою, або у хмарно-яскравий день, або рано-вранці, або наприкінці дня. Щоб виключити утворення різких тіней, що викликаються сонячним світлом, можна використовувати спалах камери. Однак, якщо в цьому немає особливої необхідності (як у деяких польових

умовах), не слід використовувати спалах як головне джерело світла (особливо вбудований спалах камери), оскільки його застосування зазвичай призводить до різкого непередбачуваного освітлення з великим контрастом.

Звичайна методика освітлення деталі при фотографуванні у приміщеннях полягає в наступному. Одну лампу встановлюють з одного боку і вище фотоапарата так, щоб освітлювалася деталь під кутом 45° . Ще одну лампу поміщають з іншого боку для підсвічування тіней приблизно на рівні апарата. Іноді ззаду деталі розташовують третю лампу для заднього освітлення.

Покази експонетра повинні бути отримані при направленні на деталь, а не на фон з білого паперу. Оскільки більшість деталей темні, у разі наведення експонетра на білий папір при фотографуванні зазвичай буває перетримка, і зменшуються тіні. При використанні стандартної освітлювальної установки необхідні витримки визначаються досить точно, що полегшує отримання позитивних негативів.

Способи освітлення при фотографуванні поверхонь зламів та невеликих деталей показані на рис. 2. Три інші способи висвітлення ілюструються рис. 3-5.

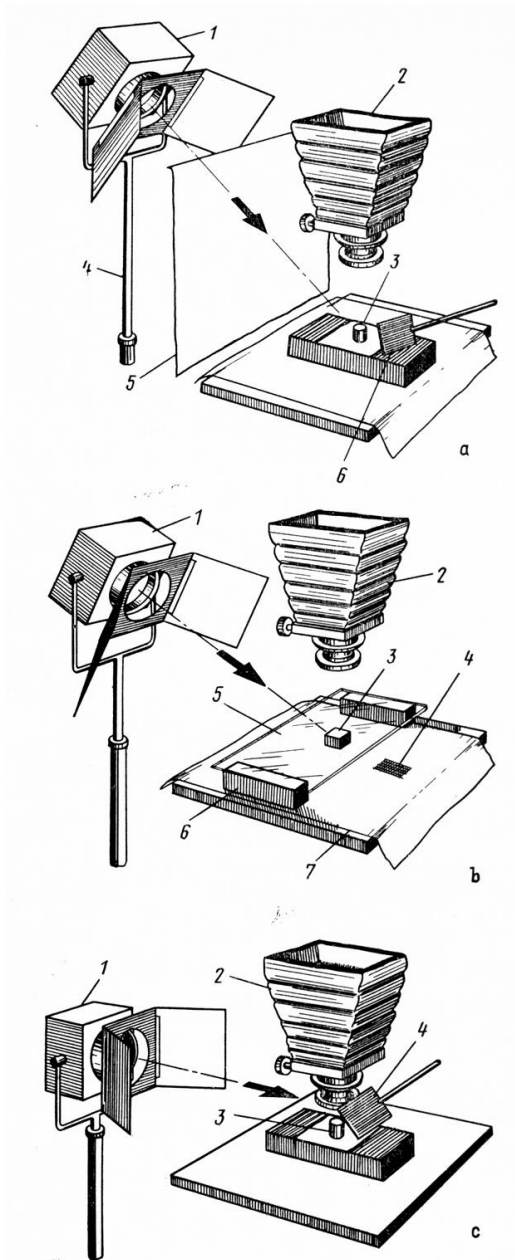


Рис. 2. Основні установки, а також варіанти освітлення, які застосовуються для фотографування зруйнованих зразків та невеликих деталей:

а - базова установка для фотографування зруйнованих деталей; розміщення фотоапарата, джерела світла з дифуззором та зразка; відстань та кут падіння світлового променя можна регулювати для отримання кращого зображення зламу; для усунення тіней використовують дзеркальний відбивач або білий картон [1 - Джерело освітлення (регулюється від точки до розсіяного потоку); 2-фотоапарат; 3 - зразок; 4 - регульований штатив; 5 - паперовий дифузор; 6 - дзеркало або білий картон, що підтримується на важелі від кільцевого штатива]; б - створення безтіньового фону при фотографуванні зруйнованих деталей; при розміщенні зразка на піднесеній скляній пластині тінь відкидається за межі площі огляду апарату, завдяки чому досягається безтіньовий фон [1 - Джерело освітлення; 2 - фотоапарат; 3 - зразок; 4 - тінь від зразка; 5 - скляна пластинка; 6 - брусок (один з двох); 7- паперовий фон]; с - горизонтальне освітлення для тісного наближення фотоапарата до зруйнованих зразків. У разі необхідності (для отримання заданого збільшення) наближення до зразка апарату, що відкидає тінь на поверхню зламу, відповідний кут освітлення створюється горизонтальним світловим променем, що відображається невеликим дзеркалом, розташованим поблизу об'єктива апарату (1 - джерело освітлення; 2 - фотоапарат; 3 - зразок; 4 - дзеркало)

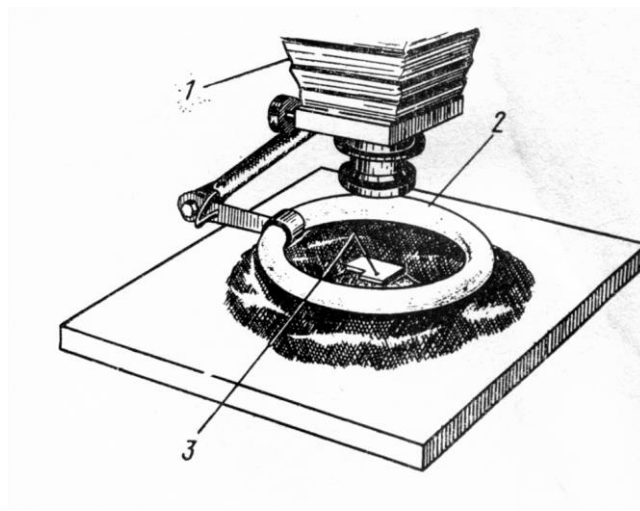


Рис. 3. Застосування кругової флуоресцентної трубки, що забезпечує м'яке мало контрастне рівне освітлення по колу та мінімум теплового

випромінювання: 1 - фотоапарат; 2 - кругова флуоресцентна трубка; 3 – зразок

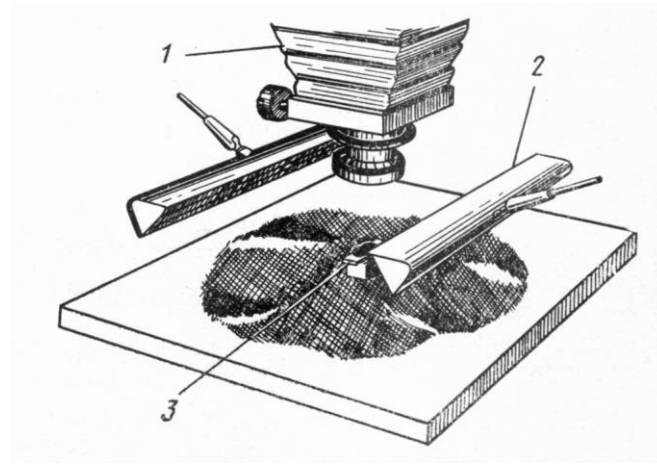


Рис. 4. Паралельне освітлення. Похиле освітлення створюється з двох сторін. Іноді доцільно використовувати одну флуоресцентну лампу як основне джерело та висвітлити тіні, що відкидаються нею, розміщуючи другу лампу далеко від зразка або використовуючи малопотужну флуоресцентну трубку: 1 - фотоапарат; 2 - лампа; 3 - зразок.

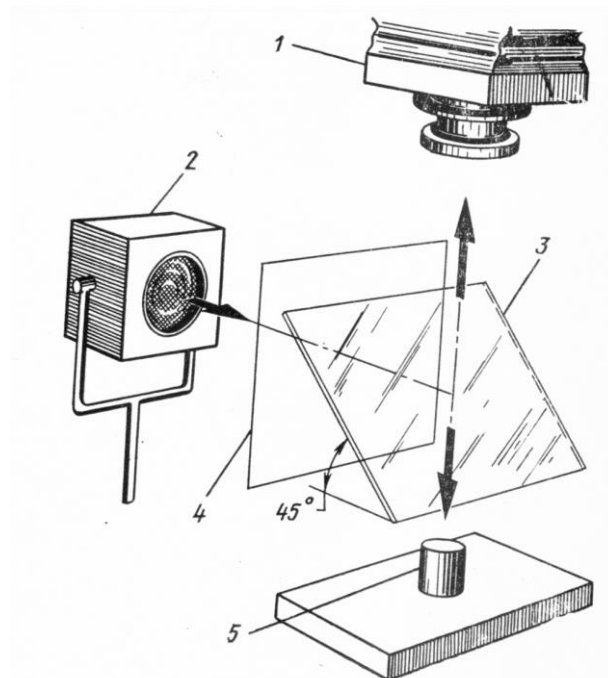


Рис. 5. Вертикальне висвітлення. Під об'єктивом під кутом 45° до оптичної осі поміщають скляну пластину. Вона відображає промінь світла на поверхню зразка, звідки через скляну пластину відбитий промінь потрапляє в об'єктив фотоапарата. Це призводить до дворазових втрат світла, так що до об'єктива доходить близько однієї чверті світлового потоку (або навіть менше в залежності від відбивної здатності скла). Вертикальне освітлення, що використовується в металографії, по суті засноване на тому ж принципі: 1 - фотоапарат; 2 - джерело світла, 3 - скло, 4 - розсіювач, 5 - зразок

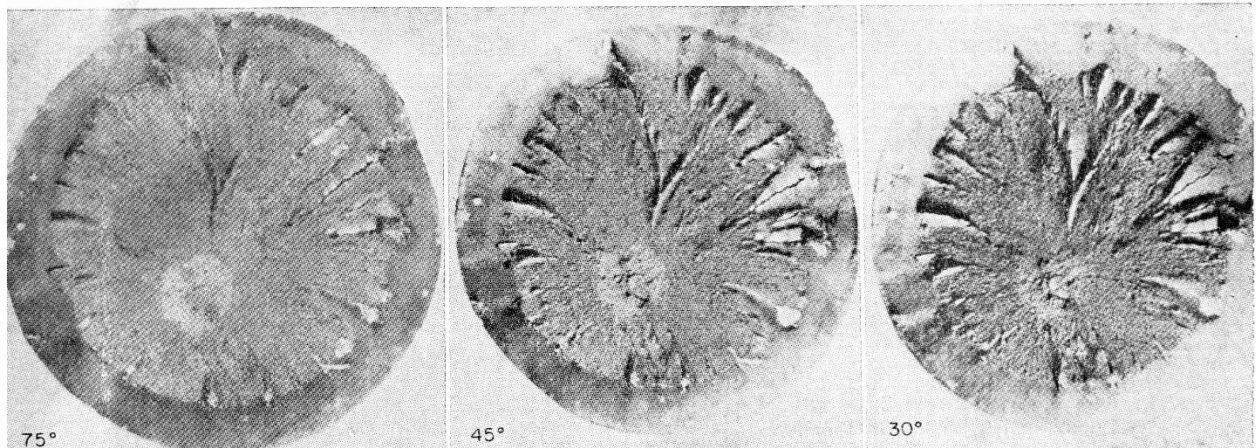


Рис 6 Світлові фрактограми (x7), що показують вплив кута падіння променя на вигляд поверхні зламу гладкого зразка зі сталі 4340, випробуваного на розтяг. Мікроструктура сталі – відпущений мартенсит. У міру наближення кута освітлення до 90° зображення поверхні зламу стає позбавленим яскравих деталей. Оптимальний кут нахилу залежить від природи деталей рельєфу.

Безтіньове освітлення поверхні можна отримати на білому фоні, розташовуючи зразок на шматку скла вище за паперовий фон, або на чорному тлі. Для основного висвітлення рекомендується один софіт. Аркуш кальки, поміщений, між лампою та зразком, розсіює світло. Крім того, лампу можна піднімати або опускати, а світловий пучок регулювати для отримання необхідного освітлення. Структура зламу висвітлюється краще, якщо лампу вміщують під порівняно малим кутом. Промінь софіту без розсіювача або кругла електрична лампа з маленькою ниткою напруження створюють високо контрастне освітлення. Перевага цього способу для виявлення структури показана на рис. 6 для трьох різних кутів освітлення. Вплив кута падіння світла набагато більший, ніж вплив його інтенсивності.

Інші приклади впливу різних способів освітлення на фіксований вид поверхні зламу наведено на рис. 7. Для даного зламу кругове освітлення (рис. 7, а) дуже невдало, а вертикальне освітлення (рис. 7, d) забезпечує більш повне виявлення тонких деталей зламу, головним чином завдяки кращому відображенню від [усталостної зони](#).

Вертикальне освітлення досягається розміщенням скляної пластини нижче за об'єктив під кутом 45° . При цьому світло, що падає, відбивається на зразок і потім від зразка через скляну пластину - на об'єктив (див. рис. 5). Таким чином, світло від бічного джерела використовують для освітлення у напрямку об'єктива. Цей спосіб особливо підходить для фотографування

донної частини порожнин. Щоб уникнути зайвих відображень, кімнатне світло має бути затінене.

Різні методи висвітлення зіставлені також на рис. 8, на якому показана різниця у виявленні поверхні зламу при використанні кругової імпульсної лампи (а), похилого освітлення за допомогою софітів (b), паралельного флуоресцентного похилого освітлення (с) і 360-градусного кругового косоного флуоресцентного освітлення (d).

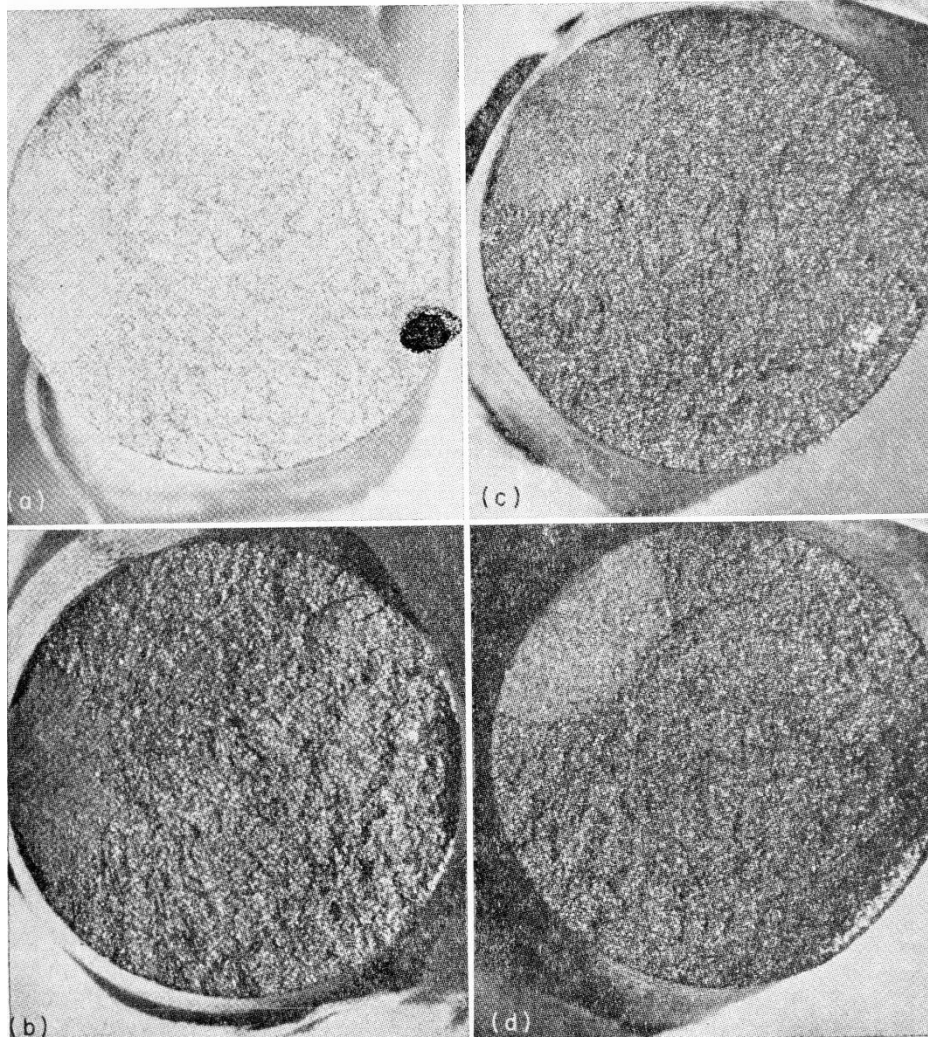


Рис. 7. Вплив способу освітлення на вигляд поверхні зламу зразка, випробуваного на втому; матеріал - сталь 1039, загартована та відпущена на твердість HRC 42. x2:

а - фотографування при круговому освітленні за допомогою флуоресцентної трубки; низький контраст та втрата деталей зображення;

б - фотографування при похилому освітленні за допомогою точкової лампи; загальна поверхня зламу здається контрастнішою, ніж на рис. а, проте зона втомного руйнування видно дуже нечітко;

с - фотографування під час освітлення від дзеркала в об'єктиві камери; якість фрактограми приблизно така ж, як і на b;

d - фотографування при вертикальному освітленні; для цієї конкретної поверхні зламу вертикальне освітлення дало найкращий контраст і дозволило виявити всі деталі рельєфу.

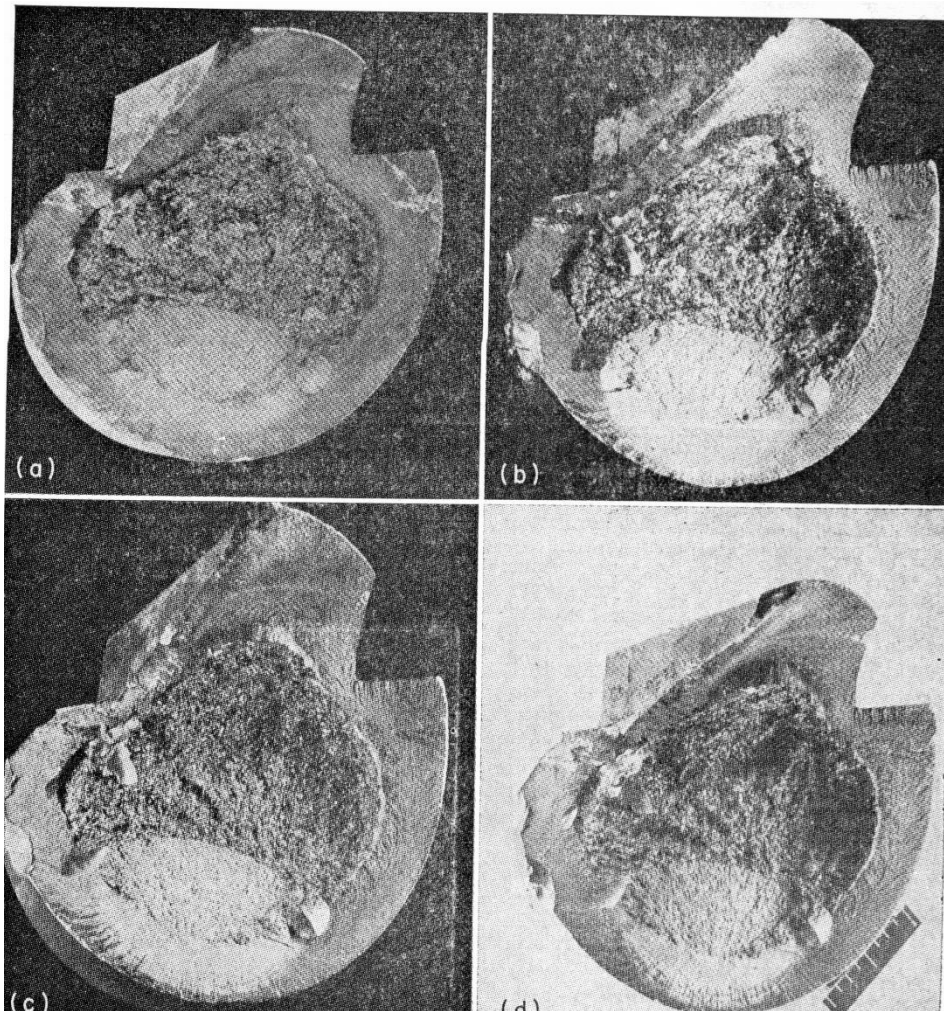


Рис. 8 - Вплив способу освітлення на вигляд поверхні **втомного** зламу поверхнево загартованого зразка зі сталі 15В 28. **Втомна** тріщина зародилася на межі, що розділяє загартовану зону від серцевини. $\times 1/2$:

a) - освітлення створювалося навколо об'єктива за допомогою кругової імпульсної лампи, плоский зовнішній вигляд зламу;

b) - похиле освітлення, створене софітами, сильні світлові відблиски в зоні **втомни**;

с - паралельне похиле освітлення, створене флуоресцентними трубками, послаблення світлових відблисків;

d - кругове освітлення: похиле освітлення всіх 360° за допомогою кругових флуоресцентних трубок, добре виявлені деталі, крім центральної зони.

Наступна ілюстрація впливу різного освітлення – на рис. 9. У разі застосування вертикального освітлення (рис. 9, а) ясно видно **втомну зону** під цементованою поверхнею. На рис. 9,б - використання похилого софітного освітлення з поперечною поляризацією - **втомна зона** не виявлена зовсім, але в осередку **втомної** тріщини чітко виділяються великі силікатні включення.

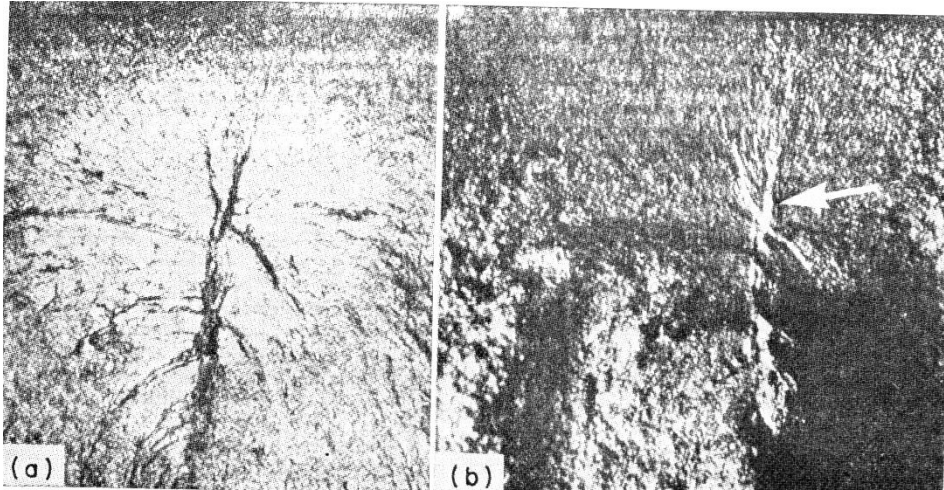


Рис. 9 – Вплив способу освітлення на вигляд поверхні руйнування зразка цементованої та загартованої сталі 8620, випробуваного на втому. X11,5:

а) - вертикальне висвітлення софітом із використанням скляної пластини; **втомна** зона добре виявлена

б) - похиле освітлення з поперечною поляризацією; **втомна** зона не помітна, але в осередку тріщини яскраво виділяється велике силікатне включення (позначено стрілкою).

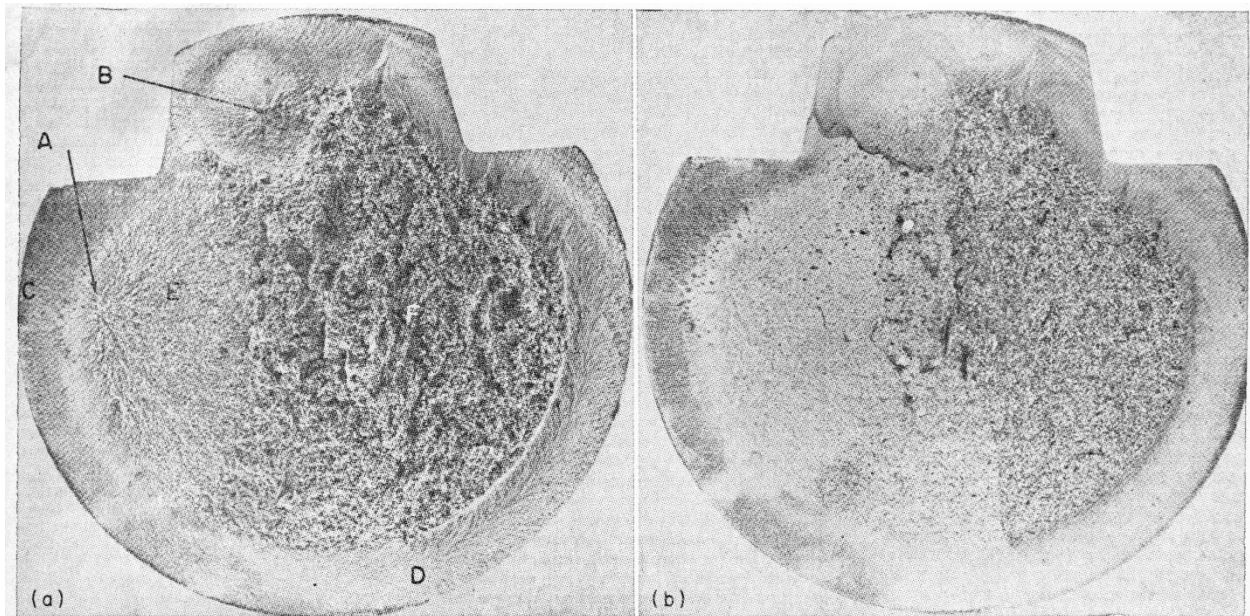


Рис. 10. Зміна виду деталей зламу внаслідок зміщення положення джерела світла. XI,15. Освітлення створювалося круговою флуоресцентною трубкою. Деталі поверхні добре видно на фрактограмі, але недостатньо на фрактограмі b, коли джерело освітлення був переміщений на 25 мм від зламу. Фрактограми поверхні **втомного** зламу валу зі сталі 1541, який був підданий індукційному загартуванню до твердості HRC 50 і випробуваний при згині з обертанням. Ліва фрактограма, що містить більше деталей, свідчить про те, що дві **втомні** тріщини (одна відзначена стрілкою А, інша В) зародилися на поверхні розділу між загартованою зоною і м'якою серцевиною. Тріщина, що зародилася в точці А, поширювалася навколо загартованої зони внаслідок втоми на ділянці С і внаслідок швидкого руйнування на ділянці D до зустрічі з тріщиною, що зародилася в точці В. Крім того, тріщина **втомни** з точки А проникла в м'яку серцевину до зони Е. І, нарешті, швидка руйнація сталася у м'якій серцевині на ділянці F

Рис 10 показує значення відносного положення джерела світла. При отриманні обох фотографій злам висвітлювали круговою трубчастою флуоресцентною лампою. У першому випадку (рис. 10, a) світло падало під певним кутом, що забезпечувало виявлення всіх деталей поверхні зламу. У другому випадку (рис. 10, b) лампа була піднята нагору на 25 мм; зміна кута нахилу падіння світла призвела до «втрати» деталей.

Поверхні зламу зазвичай лежать у багатьох площинах, відображення джерел світла яких мають вигляд дрібних блискіток. Ці блискітки дають на зображенні розпливчасті ореоли, внаслідок чого якість зображення

погіршується. Зі зменшенням діафрагми об'єктива розмір ореолів збільшується внаслідок дифракції від ірисової діафрагми. Однак використання розсіювачів зменшує проблеми, пов'язані з відображенням світла, і, знижуючи контраст в освітленості, дозволяє отримувати на фотографії деталі, розташовані в затінених ділянках зламу. При використанні софіту і кальки необхідний ступінь розсіювання може бути забезпечений шляхом регулювання відстані між калькою і деталлю, що фотографується (чим ближче деталь, тим більше контраст), а також шляхом зміни потоку світла - від вузького до широкого. Аналогічне освітлення може бути отримане при використанні інших джерел - типу невеликих флуоресцентних ламп, однак вони не мають тих можливостей регулювання, які є у випадку софітів.

При фотографуванні поверхонь зламів зразок слід повертати під об'єктивом і, спостерігаючи на матовому склі фотоапарата ефекти освітлення, виявляти більшість деталей у зонах, що становлять інтерес. Світло має перетинати пласкі елементи зламу, а не бути ним паралельним. Темні тіні з боків зразка далеко від ламп або позаду деформованих країв можуть бути заповнені світлом, відбитим від дзеркала або паперового фону, як показано на рис. 2а. Краще для цього використовувати відображене світло, наприклад, від білого фону, а не другу лампу, яка буде створювати додаткові тіні. Світло від паперового екрана м'якше і легко регулюється зміною відстані від екрана до зразка. **Світло, що заповнюється** може виявитися сильнішим, ніж текстура освітленості. При висвітленні зразків необхідно пам'ятати, що кут падіння дорівнює куту відбиття.

Світло від ламп не попадає в об'єктив; це може призвести до виникнення паразитних зображень та дифузного ореолу. За можливості рекомендується використовувати бленду об'єктива або відгороджувати лампу від об'єктива екраном із чорного паперу. У разі застосування просвітленої оптики та протиореольних плівок білий фон при натурних зйомках зазвичай не викликає труднощів. У той же час коли використовують об'єктив з дуже короткою фокусною відстанню і для отримання потрібного збільшення необхідно наблизити його до зразка, виникнення ореолу може стати досить серйозною проблемою, якщо зразок поміщають на білому папері (мал. 11а). Щоб уникнути цього зразок розміщують на чорному папері (рис. 11b). Якщо вдається досягти бажаного збільшення, використання телеоб'єктива допомагає уникнути проблем, пов'язаних з наближенням фотоапарата до зразка. При збільшеннях в 15-20 разів подача світла до поверхні зламу під кутом, що забезпечує ефективне виявлення деталей рельєфу, може бути утруднена.

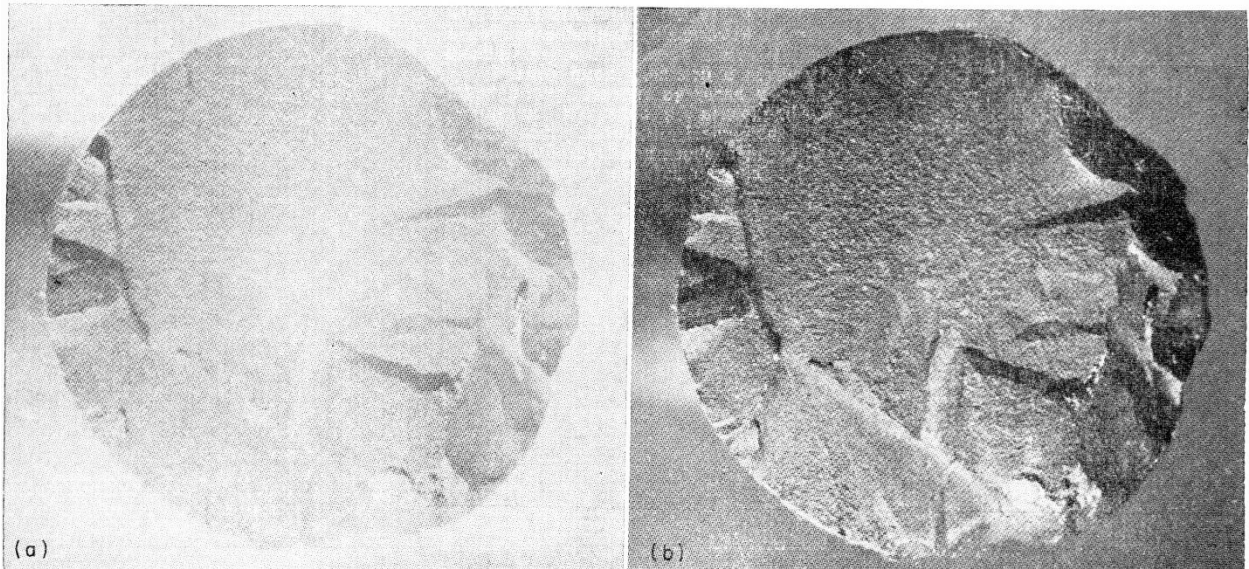


Рис. 11. Поверхня зламу стрижня вихлопного клапана зі сталі 21-4-N (SAE EV8), що сфотографована із застосуванням 40-мм об'єктива на тлі білого (а) та чорного (b) паперу. У випадку а через ореол, обумовлений білим фоном, не видно деякі деталі. Чітка картина отримана, коли зразок було поміщено на чорний папір (b) і ореол був усунений. x10.

2.5. Допоміжне обладнання

Для отримання фотографій загального вигляду важливо використовувати міцний **триніжок** (штатив). Цей штатив повинен мати голівку, яка дозволяє обертати фотоапарат, нахилити його вгору та вниз, а також повертати в різні боки на повні 90° . Є також можливість підйому центральної стійки. Використання штатива дає можливість, коли це необхідно, застосовувати витримки тривалістю 1 с і більше, що у поєднанні з малою величиною відкриття діафрагми забезпечує збільшення глибини фокусу. Покращенню якості знімків має сприяти встановлення фотоапарата у фіксованому, наперед визначеному положенні. Це дозволить уникнути розмазування контурів об'єкта у разі усунення апарата. Хороший штатив робить зайвим застосування спалаху, за винятком тих випадків, коли необхідне підсвічування тіней. Для запобігання будь-якому переміщенню апарата під час експозиції корисно використовувати **тросик**.

Для макрофотографування дрібних деталей та копіювання доцільно використовувати штатив, аналогічний штативам, що застосовуються у фотозбільшувачах вертикального типу. Такий штатив дає можливість плавно

піднімати та опускати весь апарат незалежно від налаштування на фокус. Якщо потрібні довгі міхи, то горизонтальні штативи до фотоапаратів роблять фокусування легшим.

Нижче наводиться перелік необхідних допоміжних засобів для фотографування зруйнованих зразків:

1. Шматки дерева різних розмірів для підпірки зразків у різних положеннях.

2. Лабораторні домкрати для опори чи кріплення зразків.

3. Шматки твердого пінопласту в якості опори зразків. Ці шматки можна вирізати необхідних розмірів і надавати їм потрібну форму.

4. Формувальні матеріали, наприклад модельний клей, силіконова шпаклівка та ювелірний віск, - для кріплення невеликих деталей. Для забезпечення паралельності граней можна використовувати засоби для вирівнювання із запресуванням зразка в цей матеріал. Якщо можливо, цей матеріал слід поміщати під зразком або закривати його таким чином, щоб його не було видно на фотографії.

5. Лабораторні кільцеві штативи із затискачами для утримувачів або відбивачів.

6. Дзеркала кількох розмірів, які використовують як рефлектори для освітлення затінених ділянок; для уточнення величини відкриття діафрагми об'єктива, якщо фотоапарат встановлений у незручному для огляду положенні; для демонстрації обох сторін зразка на одному знімку, наприклад, при фіксації положення датчиків деформації.

В даний час для дослідження зламів при невеликих збільшеннях або при невеликому зменшенні (для отримання загальної картини зародження та розвитку тріщини) застосовують цифрові фотокамери з досить високою роздільною здатністю (не менше 10 Мпкс.).

І тут також рекомендується використання штативів. Вимоги до освітлення залишаються ті самі, що зазначені вище.

Під час зйомки цифровою фотокамерою слід правильно призначати параметри фотографування:

- відключити автоматичний спалах;
- встановити режим макрозйомки;

- оптичним збільшенням вибрати оптимальне збільшення;
- підібрати освітлення;
- вибрати фон;
- встановити оптимальний нахил камери та освітлювальних приладів.

Для визначення дійсного збільшення на знімку поруч з об'єктом, що фотографується, рекомендується розташувати тестовий об'єкт (як правило, лінійку).

3. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Отримати у викладача зразок для досліджень. Виміряти його геометричні параметри та записати в журнал звіту номер, розміри, марку матеріалу, спосіб отримання та спосіб руйнування зразка.

2. Підготувати поверхню руйнування для досліджень, згідно з вищеописаними методиками.

3. Вивчити опис цифрової фотокамери та встановити необхідні параметри зйомки.

4. Підготувати робоче місце для зйомки (у фотокімнаті): вибрати фон для зйомки (білий, чорний, сірий); ознайомитися з будовою освітлювальних приладів та встановити три варіанти освітлення – одностороннє похило, двосторонньо похило, одно - та двостороннє пряме; вибрати тестоб'єкт.

5. Зробити фотографування досліджуваного зразка при різних збільшеннях (мінімум 3), різних способах освітлення та фону (як мінімум 6).

6. Перенести отримані зображення на комп'ютер і зробити їх обробку за допомогою програмного забезпечення (наприклад, Photoshop) та у редакторі Word.

7. Оформити звіт про роботу із зазначенням характеристик зразка.

8. Вибрати та обґрунтувати режим фотографування. Навести отримані фотографії.